



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commande Electrique

Thème

Commande d'un Hacheur "BOOST "
Alimenté par un Panneau Solaire à l'Aide
d'une Carte Arduino

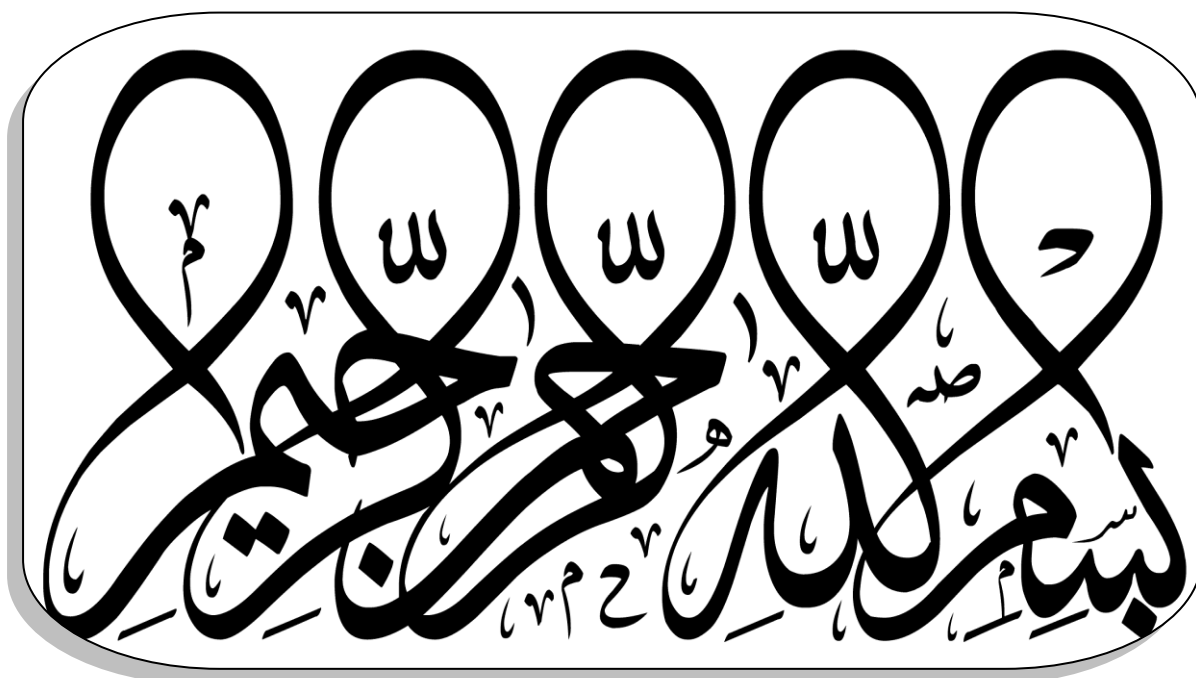
Réalisé par :

- TEDJINI Madani
- HANANCHA Taha

Encadré par :

Dr. BEKAKRA Youcef

Soutenu en Mai 2017



Dédicace

Je dédie ce modeste travail qui a été fait grâce à Dieu :

À mes chers parents :

Sources de mes joies, secrets de ma force

Vous serez toujours le modèle

Papa, dans ta détermination, ta force et ton honnêteté

Maman dans ta bonté, ta patience et ton dévouement pour us

Merci pour tous vos sacrifices

Merci d'être tout simplement mes parents

Je vous dois ce succès ;

À mes frères et sœurs ;

À mon binôme "Taha" ;

À tous mes amis ;

À tous mes collègues de la section "Commande Electrique" promotion 2017 ;

*À tous mes professeur de département de Génie Electrique et tous les enseignants
qui ont m'apprentis pendant tos mon étude ;*

*Et enfin à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation
de ce travail.*

Madani 

Dédicace

Je dédie ce modeste travail qui a été fait grâce à Dieu :

À mes chers parents :

Sources de mes joies, secrets de ma force

Vous serez toujours le modèle

Papa, dans ta détermination, ta force et ton honnêteté

Maman dans ta bonté, ta patience et ton dévouement pour us

Merci pour tous vos sacrifices

Merci d'être tout simplement mes parents

Je vous dois ce succès ;

À mes frères et sœurs ;

À mon binôme "Madani",

À tous mes amis ;

À tous mes collègues de la section "Commande Electrique" promotion 2017 ;

*À tous mes professeur de département de Génie Electrique et tous les enseignants
qui ont m'apprentis pendant tos mon étude ;*

*Et enfin à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation
de ce travail.*

Taha 

Remerciements

Avant de faire de quelconques développements au sujet de cette expérience professionnelle, il apparaît opportun de débiter ce mémoire par des remerciements aux personnes qui m'ont beaucoup aidé au cours de ce travail.

*Nous tenons à la fin de ce travail à remercier **ALLAH** le tout puissant de nous avoir donné la foi, le courage et la volonté pour accomplir ce mémoire.*

« On dit souvent que le trajet est aussi important que la destination »

Les années d'étude nous ont permis de bien comprendre la signification de cette phrase toute simple. Ce parcours, en effet, ne s'est pas réalisé sans défis et sans soulever de nombreuses questions pour lesquelles les réponses nécessitent de longues heures de travail.

*Nous remercions infiniment **D. Bekakra Youcef**, notre encadreur de mémoire.*

Nous le remercions de nous avoir encadrés, orienté, aidé et conseillé, compréhension et gentillesse durant tout le long de notre mémoire.

*Pour la même occasion nous tenons à remercier **M^{lle}. Cherifi Hakima** qui a aidé et facilité notre travail au sein du laboratoire.*

*Sans oublier de mentionner le nom de **Mr. Regouta M-Seghir** pour sa coopération avec nous.*

Nous remercions tous nos enseignants sans exception pour leurs aides et leurs encouragements, durant notre période d'étude.

Monsieur le président, les membres de jury qui ont par leur présence notre honorer afin d'évaluer cette recherche.

*Nous tenons à remercier aussi l'Université "**Echahid Hamma Lakhdar_d'El Oued**" de nous donner l'opportunité de vivre une expérience nouvelle et passionnante.*

À tous les stagiaires, pour leur compagnie, leur joie de vivre et pour tous les bons moments passés ensemble. Leur présence a été l'occasion pour nous d'échanger sur des sujets d'études.

Nous voudrions exprimer notre reconnaissance et nous remercions les plus sincères à toutes les personnes qui ont eu la gentillesse de nous prodiguer soutien, critiques, suggestions et encouragements pour l'accomplissement du présent travail.



Résumé

ملخص:

العمل المقدم في هذه المذكرة هو انجاز محول مستمر – مستمر رافع للتوتر اعتمادا على اللوحة الضوئية وبمساعدة بطاقة Arduino تحت بيئة Simulink. وهذا بهدف استغلال الطاقة الضوئية المتجددة وتحويلها الى طاقة كهربائية والتحكم في شدتها لنتمكن من شحنها ثم استعمالها او استعمالها مباشرة. هذا يأتي بعد الدراسة النظرية للمحول الرافع للتوتر وأساليب عمله وتحليلها بعلاقات رياضية. كما اننا سنتعرف على مبدأ عمل اللوحة الضوئية وكيفية تحويل الطاقة الضوئية الى طاقة كهربائية وإدراك خصائص هذه اللوحة ونمذجتها رياضيا ثم محاكتها عبر برنامج Matlab/Simulink. ان الهدف الأول من هذا المشروع هو انجاز بطاقة الكترونية للمحول الرافع للتوتر (مستمر-مستمر) والتحكم فيها عن طريق بطاقة Arduino مع برنامج Matlab/Simulink وهذا بعد تحجيم عناصر المحول ومحاكاة النتائج عبر برنامج Matlab/Simulink وبرنامج Proteus Isis لرسم الدارات الكهربائية. كما اننا هذا المشروع قمنا ببرمجة بطاقة Arduino مع LCD عبر برنامج Arduino IDE لاستعمالها كجهاز Voltmètre لقياس وعرض التوتر بين أطراف الحمولة.

الكلمات المفتاحية :

نظام الضوئية، محول الجهد (مستمر-مستمر)، بطاقة Arduino ، الطاقة الكهربائية.

Résumé :

Ce travail est présenté la réalisation d'un convertisseur DC-DC de type Boost alimenté par d'un panneau solaire commandé par d'une carte Arduino avec Matlab/Simulink. C'est dans le but d'exploiter l'énergie photovoltaïque renouvelable de la transformer en énergie électrique et contrôler l'intensité de cette énergie pour pouvoir utiliser.

Nous allons en apprendre davantage sur le principe de fonctionnement du panneau solaire et comment convertir l'énergie photovoltaïque en l'énergie électrique. Et comprendre les caractéristiques de ce panneau par la modélisation mathématique et simulation via le programme Matlab / Simulink.

Le premier objectif de ce projet est la réalisation de la carte électronique du hacheur « Boost » commandé par la carte Arduino à l'environnement de Matlab / Simulink, après le dimensionnement des éléments de ce convertisseur et simulé les résultats dans Matlab / Simulink et logiciel Proteus Isis.

Aussi, dans ce projet nous avons utilisé la carte Arduino avec LCD via le logiciel Arduino IDE comme Voltmètre pour afficher la tension entre borne de charge

Mot clés :

Système photovoltaïque, Hacheur, Carte Arduino, Energie électrique.



Liste des Figures

Chapitre I : Généralité sur Les panneaux Solaires

Figure (I-1)	Types de rayonnement solaire reçus au sol	3
Figure (I-2)	Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné	3
Figure (I-3)	Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné	3
Figure (I-4)	Analyse spectrale du rayonnement solaire	4
Figure (I-5)	L'Effet photovoltaïque	5
Figure (I-6)	Description d'une cellule photovoltaïque	6
Figure (I-7)	Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque	7
Figure (I-8)	Les images de différents types de la cellule photovoltaïque	8
Figure (I-9)	Constitution d'un module photovoltaïque	9
Figure (I-10)	Schéma d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour	10
Figure (I-11)	Composantes d'un champ de modules photovoltaïques	10

Chapitre 2 : Modélisation du Système Photovoltaïque et du Hacheur

Figure (II -1)	Schéma équivalent d'une cellule idéale	15
Figure (II -2)	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle	16
Figure (II -3)	Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque	18
Figure (II -4)	Cellules identiques en parallèle	19
Figure (II -5)	Cellules identiques en série	20
Figure (II -6)	Montage série-parallèle de cellules photovoltaïques	20
Figure (II -7)	Module BP MSX 60	21
Figure (II -8)	Block du module BP MSX 60 dans SIMULINK	22
Figure (II -9)	Caractéristique courant-tension	22
Figure (II -10)	Caractéristique puissance-tension	22
Figure (II -11)	Influence de la température sur $I(V)$	23
Figure (II -12)	Influence de la température sur $P(V)$	23
Figure (II -13)	Influence de l'éclairement sur $I(V)$	24
Figure (II -14)	Influence de l'éclairement sur $P(V)$	24
Figure (II -15)	Influence de la résistance série sur $I(V)$	24
Figure (II -16)	Influence de la résistance série sur $P(V)$	24
Figure (II -17)	Influence du facteur de qualité sur $I(V)$	25
Figure (II -18)	Influence du facteur de qualité sur $P(V)$	25
Figure (II -19)	L'influence de l'association des modules	25
Figure (II -20)	Différentes zones de la caractéristique $I(V)$, $T = 25^\circ\text{C}$	27
Figure (II -21)	Schéma de principe du hacheur	27
Figure (II -22)	Schéma de principe d'un hacheur Boost	29
Figure (II -23)	Signal de commande de l'interrupteur K	30
Figure (II -24)	Chemin actuel avec MOSFET ON	31
Figure (II -25)	Les formes d'ondes des V_L et I_S dans la premier Séquence	32
Figure (II -26)	Chemin actuel avec MOSFET désactivé	32
Figure (II -27)	Les formes d'ondes des V_L et I_S dans la deuxième Séquence	33



Liste des Figures

Figure (II -28)	Formes d'ondes obtenues en conduction continue	36
Figure (II -29)	Caractéristiques de transfert paramétrées par RL	38
Figure (II -30)	La diode.	39
Figure (II -31)	Diagramme puissance-fréquence des composants	40
Figure (II -32)	Symbole de transistor –MOSFET "IRF830N"	41
Figure (II -33)	L'inductance de bobine	43
Figure (II -34)	Schéma de mesure l'inductance de bobine	43
Figure (II -35)	Réalise le circuit de mesure l'inductance de bobine	44
Figure (II -36)	Un condensateur 2200 μ f, 35V	44
Figure (II -37)	Schéma bloc du hacheur «Boost»	45
Figure (II -38)	Allure de tension du Mosfet V_K	45
Figure (II -39)	Allure du courant du Mosfet I_K	46
Figure (II -40)	Allure de la tension de diode V_D	46
Figure (II -41)	Allure du courant de diode I_D	47
Figure (II -42)	Allure de la tension de sortie V_s	47
Figure (II -43)	Allure de le courant de sortie I_s	48
Figure (II -44)	Allure de la tension de sortie V_s	48
Figure (II -45)	Allure de le courant de sortie I_s	49

Chapitre 3 : Commande du Hacheur à L'aide de La carte Arduino

Figure (III-1)	Structure de commande du hacheur	50
Figure (III-2)	Un signal MLI (PWM)	51
Figure (III-3)	La carte Arduino UNO	54
Figure (III-4)	Microcontrôleur Atmega328	55
Figure (III-5)	Constitution de la carte Arduino UNO	58
Figure (III-6)	Interface IDE Arduino	58
Figure (III-7)	Paramétrage de la carte	59
Figure (III-8)	Les étapes de téléchargement du code	60
Figure (III-9)	Utiliser MATLAB pour communiquer avec la carte Arduino	60
Figure (III-10)	Communication de carte Arduino avec MATLAB	61
Figure (III-11)	Architecture interne de la carte Arduino Uno	61
Figure (III-12)	Schéma électronique de la carte Uno	61
Figure (III-13)	Typon de la carte Uno	61
Figure (III-14)	Schéma fonctionnel du Hacheur (Boost)	62
Figure (III-15)	Schéma de l'optocoupleur	62
Figure (III-16)	Schéma fonctionnel de l'optocoupleur	62
Figure (III-17)	Radiateur de composant	63
Figure (III-18)	Schéma du Hacheur (Boost) dans PROTEUS-ISIS	64
Figure (III-19)	La relation entre l'Arduino et MOSFET dans le primaire cas	64
Figure (III-20)	La relation entre l'Arduino et MOSFET dans le deuxième cas	64
Figure (III-21)	Résultats de simulation en PROTEUS Isis pour $\alpha_{MAX}=66\%$	65
Figure (III-22)	Résultats de simulation en PROTEUS Isis pour $\alpha_{MAX}=20\%$	65
Figure (III-23)	Tester le montage du hacheur dans la plaque d'essai	66
Figure (III-24)	Le circuit du hacheur « Boost » réalisé localement	66



Liste des Figures

Figure (III-25)	Schéma de liaison l'Arduino avec logiciel MATLAB\Simulink et hacheur « Boost »	67
Figure (III-26)	Liaison l'Arduino avec logiciel MATLAB\Simulink et hacheur « Boost »	67
Figure (III-27)	Broches du LM317	68
Figure (III-28)	Schéma du LM317	68
Figure (III-29)	Montage du LM317	69
Figure (III-30)	Schéma de voltmètre à l'aide de la carte Arduino	69
Figure (III-31)	Mesurer la tension par La carte Arduino	70
Figure (III-32)	Schéma de voltmètre numérique à l'aide de la carte Arduino et LCD	70
Figure (III-33)	Voltmètre numérique par la carte Arduino	71
Figure (III-34)	Schéma bloc global	71
Figure (III-35)	Circuit de charge	72
Figure (III-36)	Réalisation d'essais	73
Figure (III-37)	La réalisation du premier essai, pour $\alpha=20\%$	73
Figure (III-38)	La réalisation du second essai, pour $\alpha=50\%$	74
Figure (III-39)	La réalisation du troisième essai, pour $\alpha=40\%$	74
Figure (III-40)	Mesure de tension de la batterie	75



Liste des Tableaux

Tableau (I -1)	Les différents types des cellules avec leur rendement	8
Tableau (II -1)	Caractéristiques électriques du module	21
Tableau (II -2)	Les valeurs de cahier des charges	39
Tableau (II -3)	Caractéristiques de diode "1N4007 HY"	40
Tableau (III -1)	Les gammes de la carte Arduino	53
Tableau (III -2)	Spécifications techniques de la carte Arduino UNO	54
Tableau (III -3)	Les composants utilisés dans la carte électronique	63
Tableau (III -4)	La relation entre l'Arduino et MOSFET	64



Liste des Abréviations

PV : Photovoltaïque ;
GPV : Un Générateur Photovoltaïque ;
a-Si : Silicium Amorphe ;
p-Si : Silicium Poly Cristallin ;
m-Si : Silicium Mono Cristallin ;
GaAs : Arséniure de Gallium ;
EVA : Acétate D'éthylène-Vinyl ;
DC-DC : Direct Current-Direct Current ;
MOSFET: Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor;
IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor;
ESR : Equivalent Série Résistance ;
MLI : Modulation de Largeur d'Impulsions ;
PWM: Pulse Width Modulation;
IDE: Integrated Development Environment;
USB: Universal Serial Bus;
SPI : Interface Série Périphérique ;
HEX: Hexadecimal;
TWI : Two Wire Interface ;
CAO : La conception assistée par ordinateur ;
LCD : Liquid-crystal display.
MCC : Moteur a Courant Contenu.



Liste des Nomenclatures

h : La constante de Planck. égale à $6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^{-1}$;
 C : La vitesse de propagation égale à $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$;
 λ : La longueur d'onde ;
 η : Le rendement de la cellule photovoltaïque ;
 P : La puissance produite par le générateur PV ;
 E : L'éclairement absorbé par la cellule ;
 S : La surface de la cellule [m^2] ;
 $E_{\text{réf}}$: L'éclairement de référence (1000 W/m^2) ;
 I_0 : Courant de saturation inverse de la diode ;
 V_t : Tension thermique ;
 N : Facteur de l'idéalité de la photopile ;
 K : Constant de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) ;
 q : la charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) ;
 T : Température de la jonction des cellules PV [$^{\circ}\text{K}$] ;
 T_n : Température de référence des cellules PV [$^{\circ}\text{K}$] ;
 B : facteur d'idéalité de la jonction ;
 E_g : Énergie de gap [ev] ;
 I_{pv} : Courant générer par la cellule photovoltaïque ;
 I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) ;
 I_d : Le courant circulant dans la diode ;
 I_p : Le courant circulant dans la résistance ;
 R_s : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur ;
 V_{pv} : La tension de sortie ;
 I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p ;
 R_p : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction **P-N** dues aux impuretés ;
 V_{co} : La tension à circuit ouvert ;
 I_{sc} : Le courant de court-circuit ;
 ff : Facteur de forme.
 E_f : Flux incident ;
 I_{cc} : Courant de court-circuit ;
 I_{pcc} : La somme des courants de court-circuit de (N_p) cellule en parallèle ;
 V_{co} : Tension du circuit ouvert ;
 V_{pco} : Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle
 I_{cc} : Courant de court-circuit ;
 I_{scc} : La somme des courants de court-circuit de (N_s) cellule en série ;
 V_{co} : Tension du circuit ouvert ;
 V_{sco} : Tension du circuit ouvert de (N_s) cellules en série ;
 V_e : la tension continue d'entrée du convertisseur ;
 V_s : la tension continue de sortie du convertisseur ;
 L : L'inductance ;
 C : Condensateur ;
 K : L'interrupteur ;
 D : Diode ;
 α : appelé rapport cyclique ;
 R_L : la résistance série de l'inductance ;
 T : période ;
 f : fréquence.

Sommaire

Promotion 2017



Sommaire

Résumé	I
Liste des figures	II
Liste des tableaux	V
Liste des abréviations	VI
Liste nomenclature	VII
Sommaire	VIII
Introduction Générale	1

Chapitre 1 : Généralité sur Les panneaux Solaires

I-1. Introduction	2
I-2. Rayonnement Solaire	2
I-2-1. Types de rayonnement solaire	2
I-2-2. Spectre du rayonnement	4
I-3. Conversion Photovoltaïque	4
I-3-1. Définition	4
I-3-2. L'Effet photovoltaïque	5
I-4. La Cellule Photovoltaïque	5
I-4-1. Structure physique d'une cellule photovoltaïque	5
I-4-2. Fonctionnement	6
I-4-3. Rendement de la cellule photovoltaïque	7
I-5. Le Module Photovoltaïque	9
I-6. Les Systèmes Photovoltaïques	10
I-6-1. Système autonome sans batterie	11
I-6-2. Système autonome avec batterie	11
I-6-3. Système hybride PV/génératrice	11
I-6-4. Système PV sur réseau diesel	11
I-6-5. Système PV sur réseau décentralisé	12
I-6-6. Système PV centralisé	12
I-7. Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque	12
I-8. Conclusion	13

Chapitre 2 : Modélisation du Système Photovoltaïque et du Hacheur

II-1. Introduction	14
<u>II-2. Modélisation du Système Photovoltaïque</u>	15
II-2-1. Circuit Équivalent d'une Cellule Solaire	15
II-2-1-1. Cas d'une cellule idéale	15
II-2-1-2. Cas d'une cellule réelle	16
II-2-2. Les Paramètres d'une Cellule Solaire	17
II-2-2-1. La tension à circuit ouvert V_{co}	17
II-2-2-2. Le courant de court-circuit I_{sc}	17
II-2-2-3. La Puissance maximale P_{max}	17
II-2-2-4. Le facteur de qualité	18



Sommaire

II-2-2-5. Le facteur de forme ff	18
II-2-2-6. Rendement énergétique maximum η	18
II-2-3. Constitution d'un Générateur Photovoltaïque (GPV)	19
II-2-3-1. Association des cellules photovoltaïques en parallèle	19
II-2-3-2. Association des cellules photovoltaïques en série	20
II-2-4. Modélisation d'un Module BP MSX60 de BP Solaire	21
II-2-4-1. Simulation du module PV	21
II-2-4-2. Caractéristique courant- tension, puissance– tension	22
II-2-4-3. Influence de la température	23
II-2-4-4. Influence de l'éclairement	24
II-2-4-5. Influence de la résistance série	24
II-2-4-6. Influence du facteur de qualité	25
II-2-4-7. L'influence de l'association en parallèle, série, mixte des modules	25
II-2-4-8. Zone de fonctionnement du module solaire	26
II-3. Modélisation du Hacheur	27
II-3-1. Les convertisseurs continu-continu (DC-DC)	27
II-3-1-1. Les méthodes d'étude des convertisseurs de puissance	27
II-3-1-2. Structures de base des convertisseurs DC-DC	28
II-3-1-3. Les types de convertisseur DC-DC	28
II-3-2. Le Principe de Fonctionnement du Hacheur « BOOST »	28
II-3-2-1. Présentation du circuit	29
II-3-2-2. Conduction continue	31
II-3-2-2-1. Expression de V_s et I_s	33
II-3-2-2-2. Ondulation de courant ΔI_L	34
II-3-2-2-3. Ondulation de tension ΔV_s	34
II-3-2-2-4. Formes d'ondes des principaux signaux	35
II-3-2-2-5. Limitation du gain en tension	37
II-3-2-3. Dimensionnement des composants	38
II-3-2-3-1. Cahier des charges	38
II-3-2-3-2. Cellule de commutation	39
II-3-2-3-3. Interface de commande	42
II-3-2-3-4. Éléments réactifs	42
II-3-3. Simulation du Hacheur Survolteur	45
II-3-3-1. Schéma bloc	45
II-3-3-2. Résultats de simulation	45
II-4. Conclusion	49

Chapitre 3 : Commande du Hacheur à L'aide de La carte Arduino

III -1. Introduction	50
III -2. Structure de Commande du Hacheur	50
III -2-1. Génération d'une MLI (PWM)	50
III -2-2. Principe de la commande MLI	51



Sommaire

III -3. Présentation de La carte Arduino	52
III -3-1. Qu'est-ce que c'est la carte Arduino	52
III -3-2. Pourquoi choisir la carte Arduino	52
III -3-3. Les gammes de la carte Arduino	53
III -3-4. La constitution de la carte Arduino UNO	55
III -3-5. Parties de la carte Arduino UNO	55
III -3-5-1. Partie matérielle	55
III -3-5-1-1. Le microcontrôleur ATmega328	55
III -3-5-1-2. Sources de l'alimentation de la carte	56
III -3-5-1-3. Les entrées et sorties	56
III -3-5-1-4. Les ports de communications	57
III -3-5-2. Partie programme	58
III -3-5-2-1. Le logiciel Arduino	58
III -3-5-2-1-A. Structure générale du programme (IDE Arduino)	58
III -3-5-2-1-B. Injection du programme	59
III -3-5-2-1-C. Les étapes de téléchargement du programme	59
III -3-5-2-2. MATLAB Arduino	60
III -3-6. Architecture interne	61
III -4. Commande du Hacheur (Boost) par La carte Arduino UNO	62
III -4-1. Optocoupleur	62
III -4-2. Les Composants de la carte électronique	63
III -4-3. La réalisation virtuelle « PORTEUS »	63
III -4-3-1. Résultats de simulation	65
III -4-4. La réalisation de circuit électronique	66
III -4-4-1. Tester le montage du hacheur (Boost) dans la plaque d'essai	66
III -4-4-2. Réalisation du prototype	66
III -4-4-3. Liaison l'Arduino avec logiciel MATLAB\Simulink et hacheur « Boost »	67
III -5. Régulateur de Tension LM317	67
III -5-1. Description du régulateur LM317	68
III -5-2. Connexions du LM317	68
III -5-3. Fonctionnement du LM317	68
III -6. Utiliser La carte Arduino avec LCD 16x2 Comme d'un Voltmètre	69
III -7. Commande d'un Hacheur "Boost" Alimenté par un Panneau Solaire à L'aide d'une Carte Arduino	71
III -7-1. Présentation du banc d'essai	71
III -7-2. Description générale de système	72
III -7-3. Le résultat d'essai expérimental	73
III -8. Conclusion	75
 Conclusion Générale	 76
ANNEX	77
Bibliographie	83

Introduction Générale

Promotion 2017



Introduction Générale

Les énergies renouvelables se manifestent comme une solution potentielle à la réduction de la pollution. Parmi les moyens de production prometteurs (éolien, hydraulique...), le photovoltaïque (PV) apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable pour l'habitat. Ajoutons à cela la libéralisation du marché de l'électricité qui introduit des changements majeurs dans le domaine de l'énergie. Nous avons utilisé le module photovoltaïque pour alimenter notre système par énergie renouvelable et Pure.

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu (DC-DC) permettant de fabriquer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Nous avons choisi le hacheur "Boost" pour élever la tension de panneau solaire. Ce mémoire présente notre projet qui consiste à commander le hacheur "Boost" par un signal modulé en largeur d'impulsion (MLI). La commande a été programmée en Simulink \ Matlab en utilisant une carte Arduino.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres, organisés comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous avons présentés des notions générales sur les systèmes photovoltaïque .On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres et on terminera avec les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

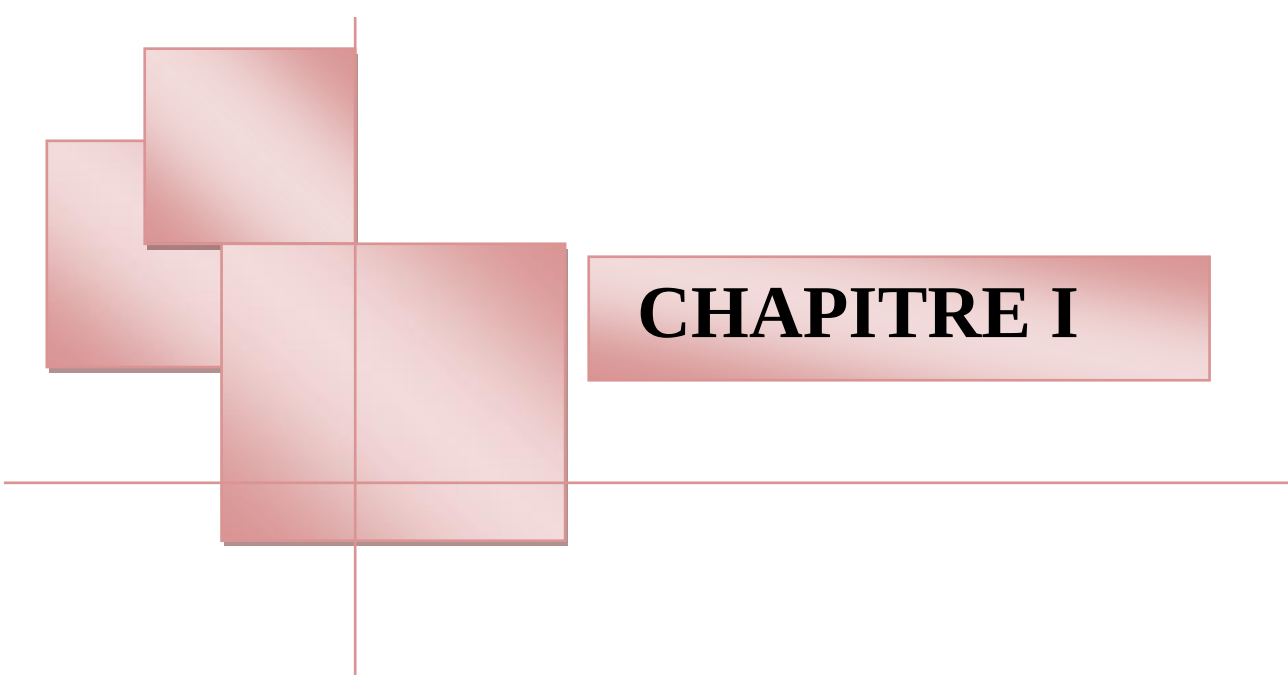
- Le deuxième chapitre est consacré la modélisation et simulation en Matlab du système photovoltaïque et ses caractéristiques. Ainsi nous avons présenté une étude théorique du convertisseur continu/continu ou bien les hacheurs. Aussi on a présenté la méthode à suivre pour dimensionner un hacheur survolteur et la simulation du ce convertisseur.

- Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la réalisation pratique d'un hacheur "Boost" alimenté par panneau solaire à l'aide d'une carte Arduino. Une description détaillée des parties matérielles (hardware) et logicielles (software) de l'application :

- Proteus Isis pour simuler le circuit du hacheur ;
- Matlab 2013 pour commander la carte Arduino ;
- Arduino IDE pour programmer la carte.

Ainsi qu'aux différents résultats d'un essai expérimental.

Enfin, dans la dernière partie, nous terminons par une conclusion générale sur cette étude.



CHAPITRE I

Généralité sur Les systèmes Photovoltaïques



Promotion 2017



I-1. Introduction :

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 10 000 W/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 14 000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique reposant sur l'effet photoélectrique des semi-conducteurs, la cellule photovoltaïque et ses performances. [1]

I-2. Rayonnement Solaire :

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître types de rayonnement et le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. [2]

I-2-1. Types de rayonnement solaire :

En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

► Le rayonnement direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire incident sur un plan donné et provenant d'un angle solide centré sur le disque solaire.

► Le rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. la conversion photovoltaïque utilisant les modules utilise aussi bien le rayonnement direct que le rayonnement diffus.

► L'albédo :

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possible. Par définition, le corps noir possède un albédo nul.



► Le rayonnement global :

C'est tout simplement la somme de ces diverses contributions. [3]

- Dans la figure (I.1) ci-dessous est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre.

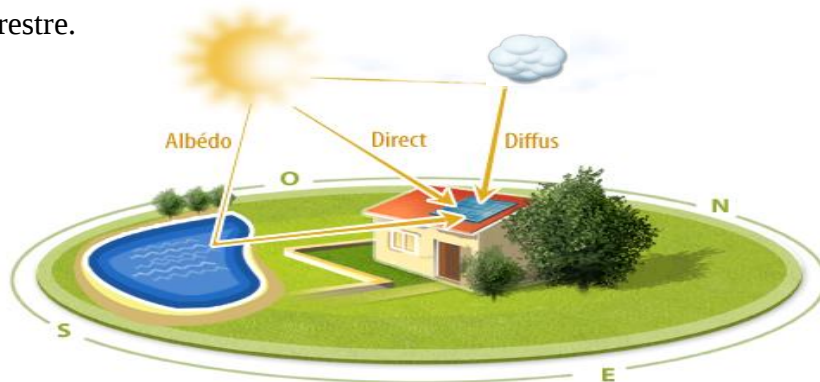


Fig. (I-1). Types de rayonnement solaire reçus au sol.

À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent utiliser que le rayonnement direct provenant du soleil. Dans les endroits avec une forte proportion d'ensoleillement diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner efficacement car l'ensoleillement diffus ne peut être concentré en un point. [4]

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre G), il s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2). La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons.

Dans la figure (I-3) ci-après est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du levé au cours de différentes périodes de la journée. [5]

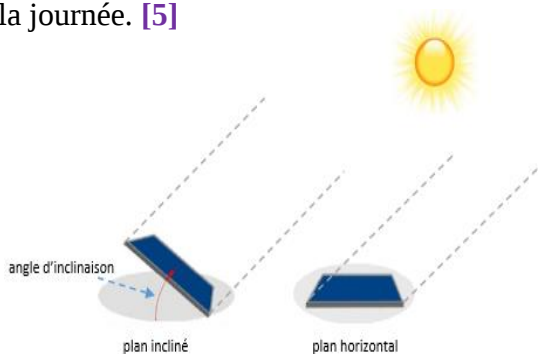


Fig. (I-2). Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné.

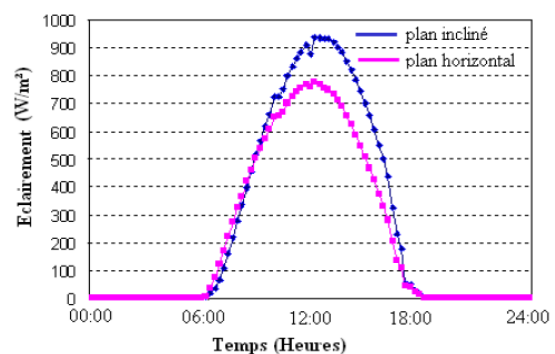


Fig. (I-3). Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné.



I-2-2. Spectre du rayonnement :

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ ; elle est donnée par la formule suivante :

$$\bullet \quad E = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.1)$$

Où :

h : La constante de Planck. égale à $6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^{-1}$

C : La vitesse de propagation égale à $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

La figure (I-4) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement en :

-Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$ 6.4%.

-Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$ 48.0%.

-Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$ 45.6%. [2]

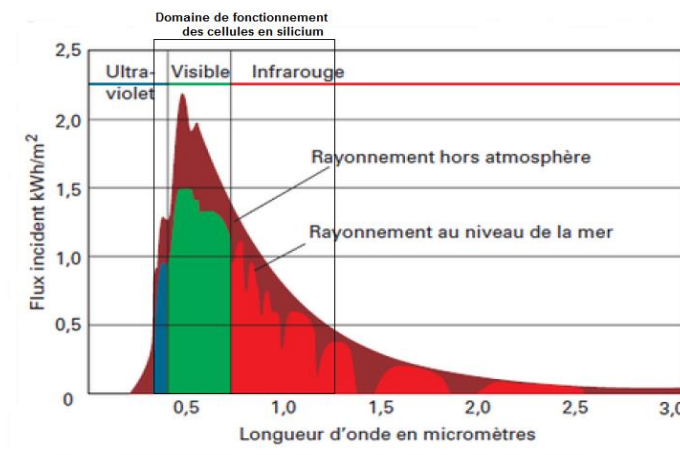


Fig. (I-4). Analyse spectrale du rayonnement solaire.

I-3. Conversion Photovoltaïque :

I-3-1. Définition :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée par les panneaux solaires est directement proportionnelle aux taux de rayonnement, elle n'est donc pas toujours constante. L'association



de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension non linéaire. [6]

I-3-2. L'Effet photovoltaïque :

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « **photos** » qui signifie lumière et de « **Volta** » du nom du physicien italien qui en 1800 découvrit la pile électrique. [7]

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque.

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés".

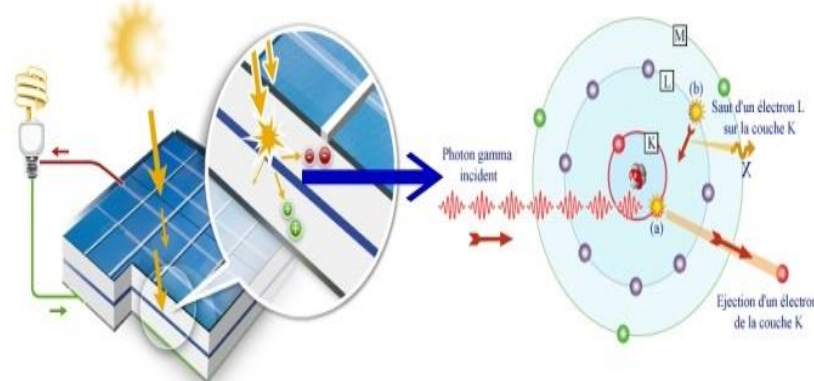


Fig. (I-5). L'effet photovoltaïque.

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

I-4. La Cellule Photovoltaïque :

I-4-1. Structure physique d'une cellule photovoltaïque :

Une photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur qui absorbe la lumière et la convertit en énergie électrique. Elle est fabriquée à



l'aide de matériaux semi-conducteurs (généralement le silicium). La cellule la plus commune d'aujourd'hui est une cellule simple au silicium de jonction **P-N** avec un rendement qui arrive jusqu'à environ 17%.

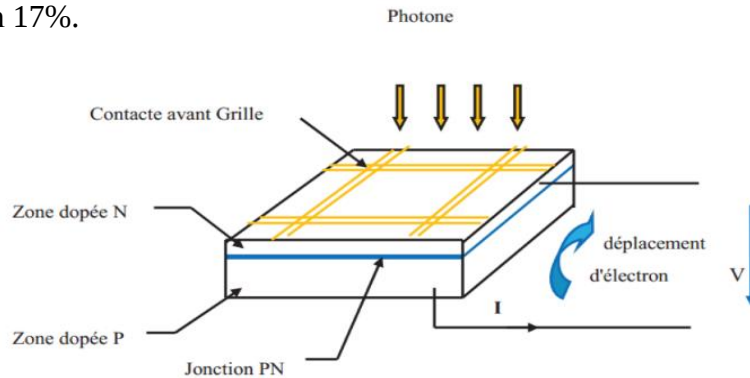


Fig. (I-6). Description d'une cellule photovoltaïque.

Elle se compose d'un substrat bas, modérément dopé **P** et d'une couche supérieure mince fortement peigne métallique **N**. un métal mince sur la couche extérieure et un contact en métal sur le dos relie cet élément photovoltaïque à la charge

I-4-2. Fonctionnement :

➤ Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque ?

La cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée **P** (dopée au bore) et l'autre dopée **N** (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction **P-N** avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction **P-N** de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges **N**) et des trous (charges **P**). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

Donc une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

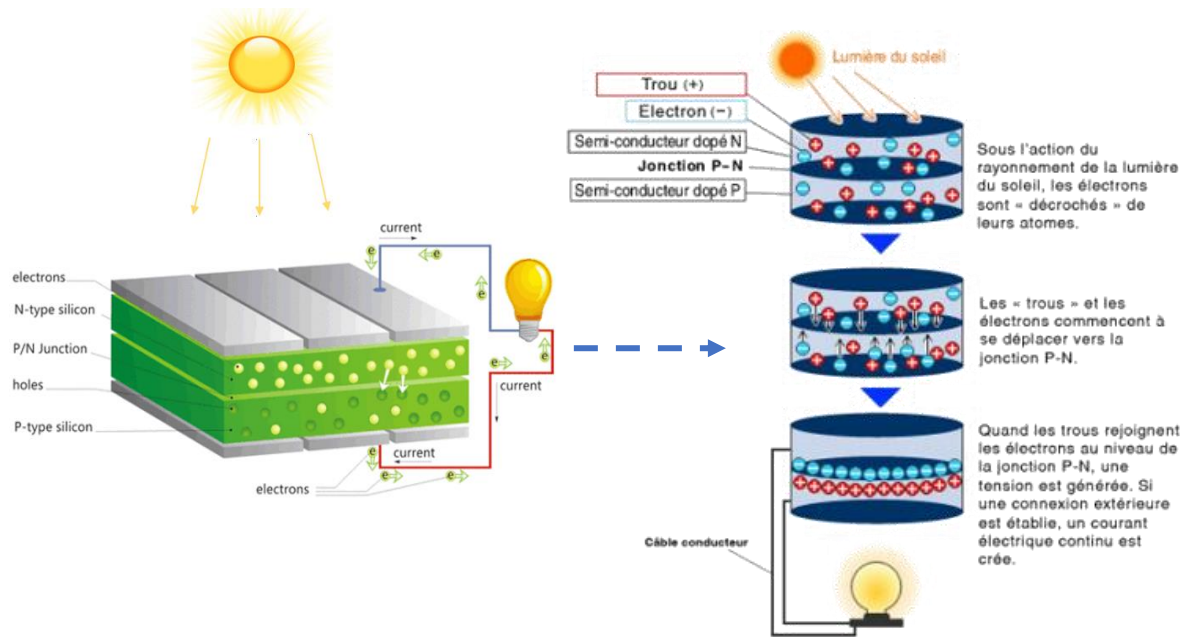


Fig. (I-7). Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction **P-N**.

I-4-3. Rendement de la cellule photovoltaïque :

Le rendement de la cellule PV est un des critères de qualité de ce type de capteur. Ainsi, cette mesure est effectuée selon des normes précises en fixant un type de spectre lumineux, une pression et une température de fonctionnement. Nous parlons ici uniquement du rendement global de conversion d'énergie des photons en électrons traduit par la puissance électrique délivrée par les cellules PV, par rapport à un éclairement de 1000 W/m² de type AM1.5 pour pouvoir ainsi effectuer des comparaisons objectives des diverses performances de cellules. [6]

$$\bullet \quad \eta = \frac{P}{E \times S} \quad (I.2)$$

η : Le rendement de la cellule photovoltaïque ;

P : La puissance produite par le générateur PV ;

E : L'éclairement absorbé par la cellule ;

S : La surface de la cellule [m²].



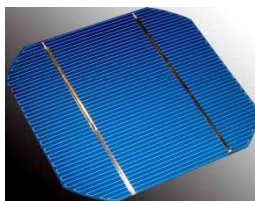
- Ce rendement dépend plusieurs facteurs :
 - Réflexion à la surface ;
 - Température de jonction des cellules ;
 - Type de matériau utilisé et technique de fabrication ;
 - La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule ;
 - Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

La plupart des cellules solaires disponibles sur le marché mondial, sont à base de silicium, soit du type mono, poly cristallin ou amorphe.

Le tableau suivant présente les différents types des cellules avec leur rendement.

Tableau (I -1). Les différents types des cellules avec leur rendement. [2]

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement en production
Silicium amorphe (a-Si)	13%	5-9%
Silicium poly cristallin (p-Si)	19.8%	11 à15%
Silicium mono cristallin (m-Si)	24.7%	13 à17%



(m-Si)



(p-Si)



(a-Si)

Fig. (I-8). Les images de différents types de la cellule photovoltaïque.

De nombreux autres composés ont fait l'objet d'études, notamment les hétérojonctions à base de sulfures (CdS et Cu₂S) puis plus récemment à base d'Arséniure de Gallium (GaAs) pour lesquels des rendements prometteurs en laboratoire ont été obtenus et dépassent les 25%, De nouveaux composés comprenant au minimum trois matériaux différents, sous forme de couches superposées ont été réalisées en laboratoire et ont produit des rendements supérieurs à 30%. [6]



I-5. Le Module Photovoltaïque :

Le module solaire est un assemblage de cellules photovoltaïques. Les cellules sont en général montées en série (la borne positive d'une cellule est reliée à la borne négative de la cellule suivante). On obtient ainsi une tension plus élevée (en général 12 ou 24V). Les panneaux photovoltaïques seront montés eux-mêmes en série si on souhaite obtenir une tension supérieure à 12 ou 24V ou en dérivation (les bornes positives des différents panneaux sont reliés ensemble, les bornes négatives également) si on souhaite obtenir une intensité plus importante. Cette module est encapsulée et protégée de l'humidité par un matériau qui enrobe les cellules c'est le l'Acétate d'éthylène-vinyl (EVA).

La face avant du module doit être en verre qui a les caractéristiques suivantes :

- Bonne transparence ;
- Résistance à l'impact et à l'abrasion ;
- Etanchéité à l'humidité.

La face arrière est généralement réalisée soit en verre (modules dits «bi-verre») soit en composite tedlar/alu/tedlar (polyéthylène).

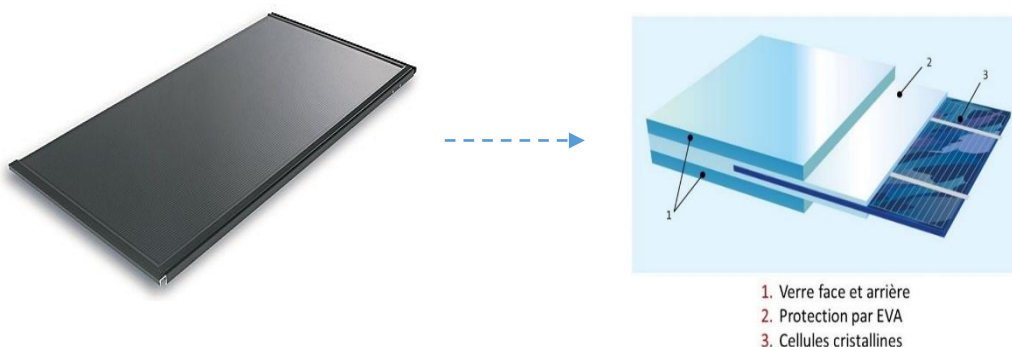


Fig. (I-9). Constitution d'un module photovoltaïque.

Le module lui-même doit être protégé afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Deux types de protection sont généralement indispensables au bon fonctionnement d'un module photovoltaïque.

► **protection par La diodes parallèles (ou by-pass)** : a pour but de protéger une série de cellules dans le cas d'un déséquilibre lié à la défektivité d'une ou plusieurs des cellules de cette série ou d'un ombrage sur certaines cellules.

► **La diode série** : placée entre le module et la batterie empêche pendant l'obscurité le retour de courant vers le module. Elle est dans ce cas appelée encore diode anti-retour. [2]

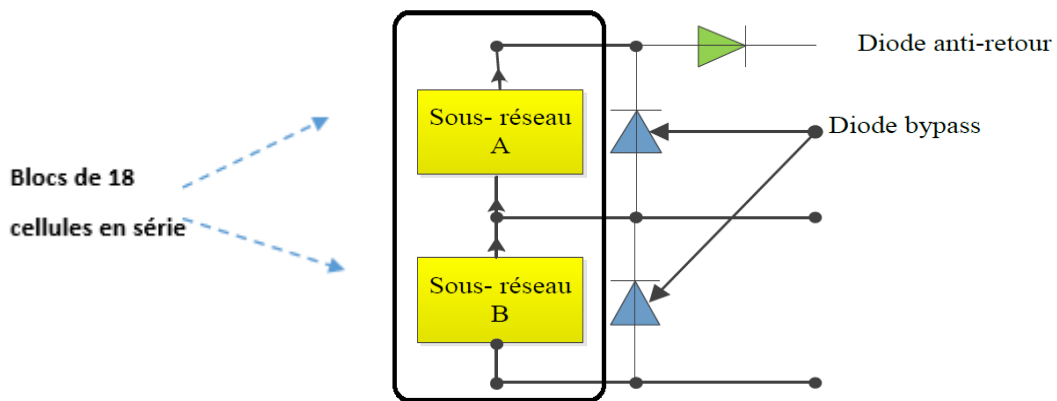


Fig. (I-10). Schéma d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

I-6. Les Systèmes Photovoltaïques :

Les modules PV sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le champ de modules PV (panneaux). L'énergie fournie par le champ peut être utilisée pour charger des batteries qui fourniront l'électricité au moment voulu. Elle peut aussi être utilisée en reliant directement les modules à la charge sans les batteries (ex. : pour une pompe solaire, l'eau sert de stockage), ou en les branchant sur un réseau électrique. Il est également possible de combiner la sortie du champ PV avec d'autres sources d'énergie telles une génératrice ou une éolienne qui serviront d'appoint, si l'ensoleillement n'est pas suffisant.

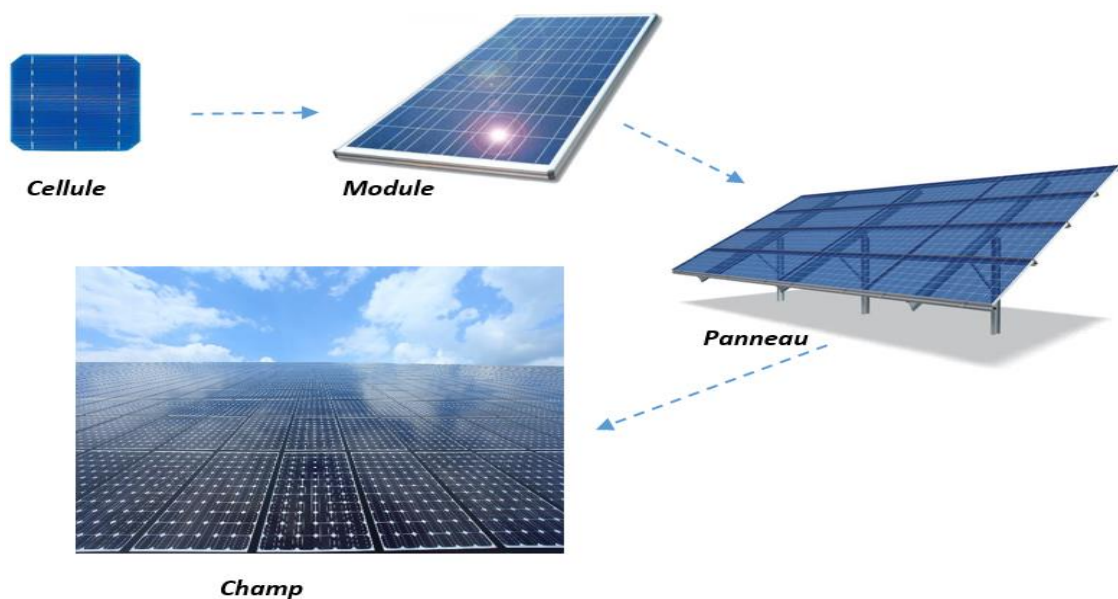


Fig. (I-11). Composantes d'un champ de modules photovoltaïques.



Bien qu'il existe une grande variété de systèmes photovoltaïques, on peut cependant les classer en six groupes distincts. Les trois premiers groupes sont des systèmes autonomes, non reliés à un réseau électrique. Les trois autres types sont des systèmes PV reliés différemment au réseau électrique.

I-6-1. Système autonome sans batterie :

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex. : calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompe à eau : le réservoir d'eau sert de stockage).

I-6-2. Système autonome avec batterie :

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. Par exemple, ce système est bien adapté pour l'éclairage d'une maison où il faut de l'électricité lorsqu'il ne fait plus jour.

I-6-3. Système hybride PV/génératrice :

Ce système utilise les avantages de l'énergie photovoltaïque et de la génératrice au diesel, au propane ou à l'essence. Le système photovoltaïque fournit une énergie intermittente mais souvent moins coûteuse en régions éloignées. La génératrice sert d'énergie d'appoint, selon la demande. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries. Les systèmes hybrides PV/génératrices sont souvent utilisés pour les tours de communications ainsi que pour les refuges et les camps forestiers en régions éloignées. Ils peuvent également être couplés avec d'autres sources d'énergie telles les éoliennes et les microcentrales hydrauliques, lorsqu'il y a une complémentarité des productions électriques.

I-6-4. Système PV sur réseau diesel :

Ce système est utilisé principalement dans les communautés ou les villages éloignés. Le générateur PV est branché en parallèle avec les génératrices au diesel du réseau villageois et fournit l'électricité sur ce réseau lorsque l'ensoleillement le permet. Il permet de réduire la consommation d'un carburant diesel très coûteux en régions éloignées et diminue les temps de fonctionnement des génératrices.

**I-6-5. Système PV sur réseau décentralisé :**

Ce système photovoltaïque est branché directement sur un réseau électrique, mais il est installé près de la demande. Il peut être installé, par exemple, sur une résidence individuelle ou sur un centre commercial, de telle sorte qu'il alimente cette charge et fournit l'excédent de sa production sur le réseau durant le jour. Durant la nuit, la charge puise l'énergie requise sur le réseau. Ce système permet de diminuer les frais de transport d'électricité et la surcharge de ligne, particulièrement en ce qui a trait aux charges adaptées à la production photovoltaïque tels les systèmes d'air conditionné (gestion de la demande).

I-6-6. Système PV centralisé :

Ce système fonctionne comme une centrale électrique normale mais doit tenir compte de la fluctuation de la production d'énergie qui est liée à l'ensoleillement. [6]

I-7. Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque :

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients.

➤ Avantages du photovoltaïque :

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien ;
- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet ;
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes ;
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable ;
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.

➤ Inconvénients du photovoltaïque :

- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 23.4 % ;
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé ;
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit ;

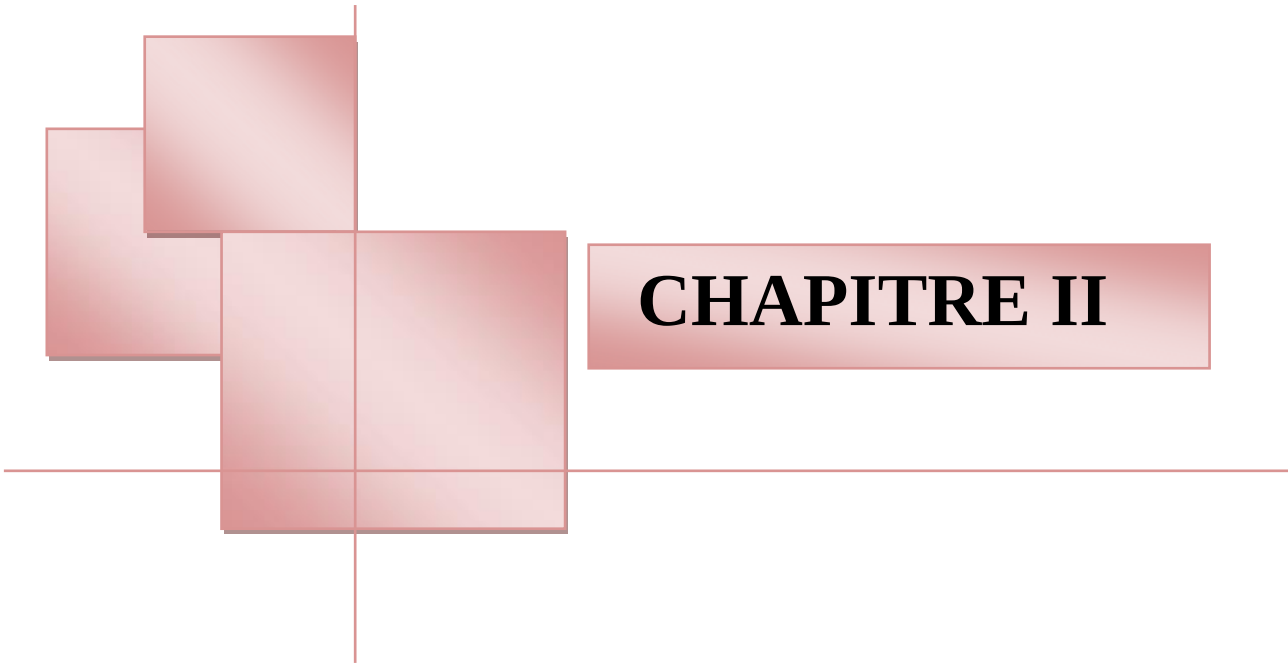


– La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an.

[2]

I-8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté : principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque, (le fonctionnement d'une cellule et le rayonnement). Et ainsi que Les différents types des systèmes photovoltaïques. Et enfin on à présenté l'avantages et l'inconvénients de l'énergie photovoltaïque.



CHAPITRE II

Modélisation du Système Photovoltaïque et du Hacheur



Promotion 2017



II-1. Introduction :

Les performances d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques telle que le rayonnement solaire, la température, la vitesse du vent et l'éclairement. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année un système PV doit être correctement dimensionnée cependant les informations fournies par les constructeur d'équipements photovoltaïques ne permettent de dimensionner qu'approximativement le système.

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur PV. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension. Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables.

Dans la première partie de ce chapitre, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque avec inclues dans les données de la fabrication. [11]

Ensuite, Afin de fournir une puissance requise il faut une adaptation de la charge avec le générateur photovoltaïque. Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur).

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons voir le principe de fonctionnement des convertisseurs DC-DC afin de déterminer les relations entre les différents signaux électriques pour une utilisation dans la simulation puis nous expliquerons comment dimensionner les différents éléments qui la composent à partir des spécifications d'un cahier des charges. [12]

La modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel Matlab /Simulink / Simpower System.



II-2. Modélisation du Système Photovoltaïque

II-2-1. Circuit Équivalent d'une Cellule Solaire :

II-2-1-1. Cas d'une cellule idéale :

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction P-N soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.1), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale.

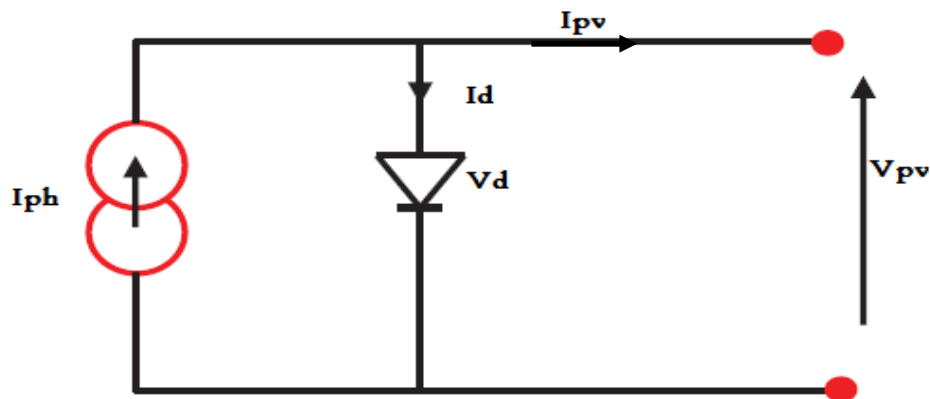


Fig. (II-1). Schéma équivalent d'une cellule idéale.

► Les équations retenues de ce modèle sont :

$$\bullet \quad I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (II-1)$$

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{sc} avec $V_{pv} = 0$, courant de court-circuit obtenu en court circuitant la charge.

$$\bullet \quad I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{réf}} \quad (II-2)$$

E : L'éclairement absorbé par la cellule ;

$E_{réf}$: L'éclairement de référence (1000 W/m^2) ;

$$\bullet \quad I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (II-3)$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

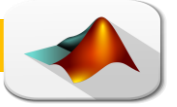
$$\bullet \quad V_t = \frac{NKT}{q} \quad (II-4)$$

V_t : Tension thermique ;

N : Facteur de l'idéalité de la photopile ;

K : Constant de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) ;

q : la charge de l'électron ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$).



II-2-1-2. Cas d'une cellule réelle :

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la **figure (II.2)**, Ce schéma équivalent est constitué d'une diode **d** caractérisant la jonction, une source de courant **I_{ph}** caractérisant le photo-courant, une résistance série **R_s** représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte **R_p** caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à **R_s**.

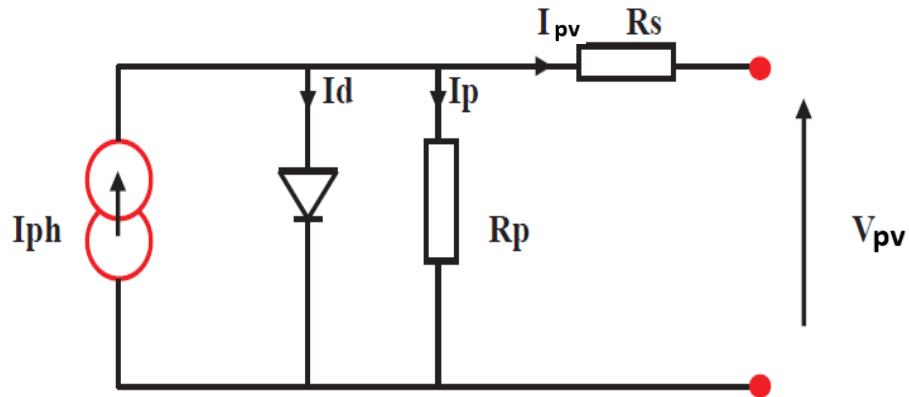


Fig. (II-2). Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple.

► Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$\bullet \quad I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (II-5)$$

I_{pv} : Courant générer par la cellule photovoltaïque ;

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) ;

I_d : Le courant circulant dans la diode ;

I_p : Le courant circulant dans la résistance **R_p**.

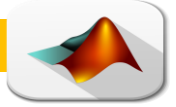
$$\bullet \quad I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (II-6)$$

$$\bullet \quad I_0 = I_{0r} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[\frac{E_g}{Bk} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (II-7)$$

I_{0r} : est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence **T_n** et l'éclairement de référence ;

T : Température de la jonction des cellules PV [°K] ;

T_n : Température de référence des cellules PV [°K] ;



B : facteur d'idéalité de la jonction ;

E_g : Énergie de gap [ev].

$$\bullet \quad V_d = V_{pv} + R_s I_{pv} \quad (II-8)$$

R_s : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules ;

V_{pv} : La tension de sortie ;

R_p : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction **P-N** dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

En substituant les équations (II-7 ; II-6) dans l'équation (II-5) le courant **I_{pv}** devient : [5]

$$\bullet \quad I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_p} \quad (II-9)$$

$$\bullet \quad I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_p} - I_{pv} = 0 \quad (II-10)$$

II-2-2. Les Paramètres d'une Cellule Solaire :

II-2-2-1. La tension à circuit ouvert **V_{co}** :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse :

$$\bullet \quad V_{co} (I = 0) = V_t \log \left(1 + \frac{I_{sc}}{I_0} \right) \quad (II-11)$$

II-2-2-2. Le courant de court-circuit **I_{sc}** :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant **V = 0** dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. On peut écrire :

$$\bullet \quad I_{sc} = I_{ph} \quad (II-12)$$

II-2-2-3. La Puissance maximale **P_{max}** :

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale **P_{max}**, correspondrait donc à la tension de circuit ouvert **V_{max}** multipliée par le courant de court-circuit.

$$\bullet \quad P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (II-13)$$



Le produit ($V_{\max} \times I_{\max}$) donne la puissance maximale qui représente 80% environ du produit ($V_{co} \times I_{sc}$).

II-2-2-4. Le facteur de qualité :

A est le facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de charge d'espace (compris entre 1 et 2).

II-2-2-5. Le facteur de forme ff :

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) :

$$\bullet \quad ff = \frac{V_{\max} \times I_{\max}}{V_{co} \times I_{sc}} \quad (II-14)$$

II-2-2-6. Rendement énergétique maximum η :

Le rendement de la cellule qui correspond au rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la puissance solaire incidente : [2]

$$\bullet \quad \eta = \frac{V_m \times I_m}{P_{\text{incidente}}} = \frac{P_{\max}}{E_f \times S} \quad (II-15)$$

S : Surface de cellule solaire ;

E_f : Flux incident.

► la figure (II.3) représente les caractéristiques courant-tension ($I=f(V)$) et puissance-tension ($P=g(V)$) d'une cellule photovoltaïque pour des conditions de travail constantes (température et ensoleillement fixes).

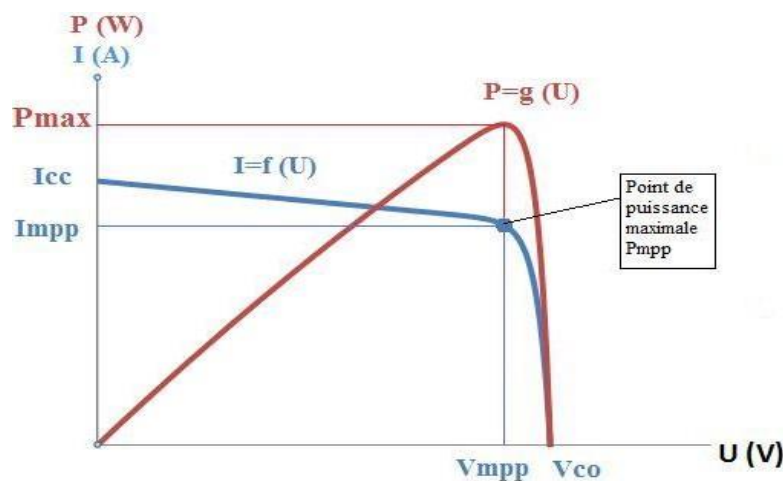


Fig. (II-3). Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.



Une convention internationale définit la puissance d'une cellule en watt-crête. Le W_c est la puissance optimale fournie par la photopile sous des conditions de mesures normalisées c'est-à-dire pour un ensoleillement de 1 kW/m^2 et pour une température de jonction de la cellule de 25°C . Une simple cellule de silicium monocristallin ayant une surface de $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ aura un rendement d'environ 14% et produira environ $1,4 W_c$ à $0,5 \text{ V}$. [6]

II-2-3. Constitution d'un Générateur Photovoltaïque (GPV) :

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur.

D'une autre part, si les cellules se en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera. [5]

II-2-3-1. Association des cellules photovoltaïques en parallèle :

Une association parallèle de (N_p) cellule **figure (II.4)** est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants :

- $I_{PCC} = N_p \times I_{CC}$ (II-16)

- $V_{PCO} = V_{CO}$ (II-17)

I_{CC} : Courant de court-circuit ;

I_{PCC} : La somme des courants de court-circuit de (N_p) cellule en parallèle ;

V_{CO} : Tension du circuit ouvert ;

V_{PCO} : Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

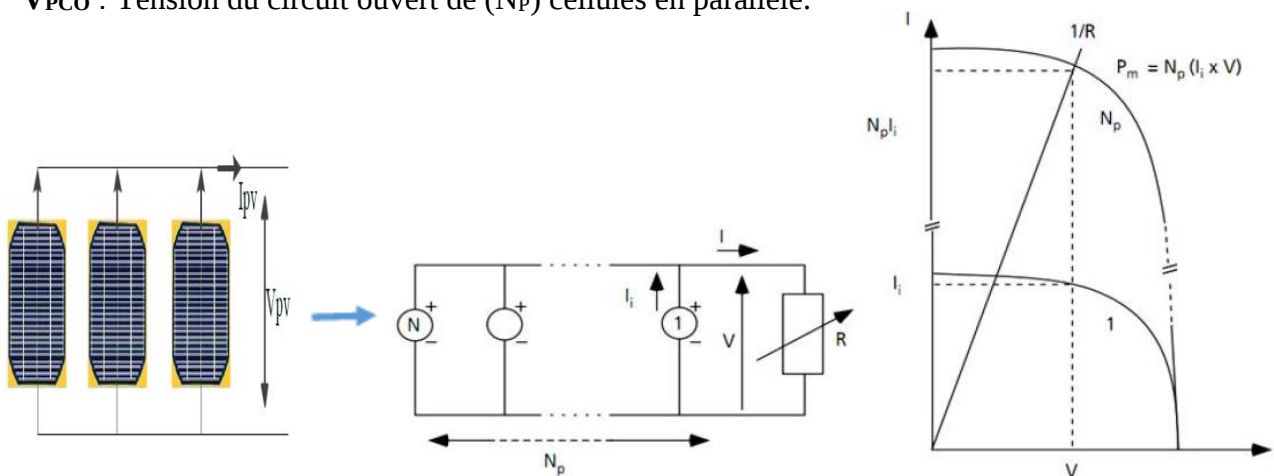


Fig. (II-4). Cellules identiques en parallèle.



II-2-3-2. Association des cellules photovoltaïques en série :

Une association de (N_s) cellule en série **figure (II.5)** permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de (N_s) cellules : [8]

- $I_{SCC} = I_{CC}$ (II-18)

- $V_{SCO} = N_s \times V_{CO}$ (II-19)

I_{CC} : Courant de court-circuit ;

I_{SCC} : La somme des courants de court-circuit de (N_s) cellule en série ;

V_{CO} : Tension du circuit ouvert ;

V_{SCO} : Tension du circuit ouvert de (N_s) cellules en série.

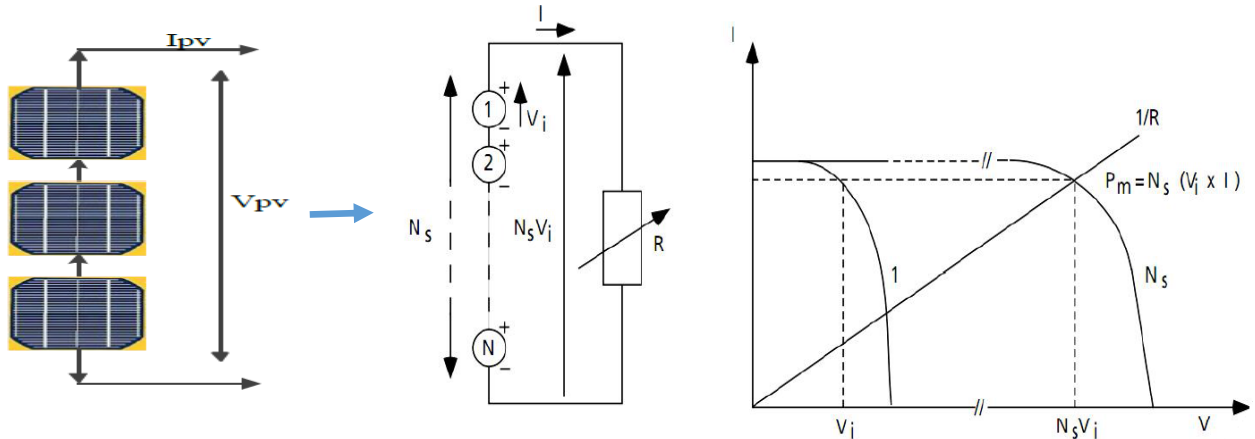


Fig. (II-5). Cellules identiques en série.

II-2-3-3. Association des cellules photovoltaïques « série-parallèle » :

Généralement, on utilise un montage série-parallèle qui nous permet de régler à la fois la tension et le courant selon les caractéristiques de la charge. Les cellules photovoltaïques sont associées entre elles en série, et les modules sont associés en parallèle. [6]

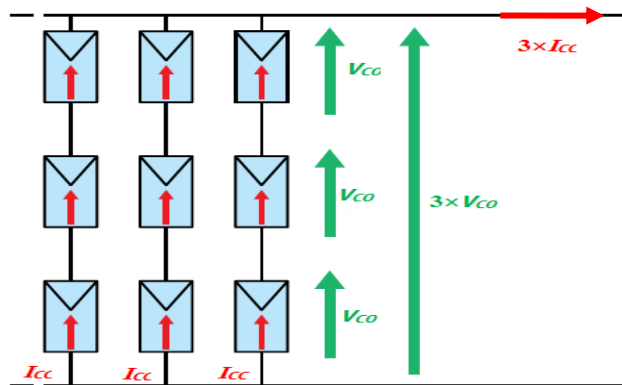


Fig. (II-6). Montage série-parallèle de cellules photovoltaïques.



II-2-4. Modélisation d'un Module BP MSX60 de BP Solaire :

II-2-4-1. Simulation du module PV :

Dans ce travail nous avons simulé le module **BP MSX60**. Ce module est constitué de 36 cellules solaires en silicium poly-cristallin configurées électriquement en deux séries de 18 cellules chacune. Le module **BP MSX60** peut produire une puissance maximale de 60 watts à 16.8 volts. Ceci nous a permis de déterminer la puissance en fonction de la tension et le courant en fonction de la tension du module étudié pour un éclairement de 1000 W/m^2 . Les caractéristiques électriques du module Photovoltaïque **BP MSX60** en conditions de test standards sont représentées sur le **tableau (II.1)**. [9]

Tableau (II -1). Caractéristiques électriques du module.

Grandeurs	Valeur
- Eclairement standard, E	1000 W/m^2
- Température standard, T	25°C
- Puissance crête maximale, Pm	60 W
- Tension maximale, Vm	16.8 V
- Courant maximal, Im	3.56A
- Tension de circuit ouvert, Vco.	21 V
- Courant de court-circuit, Icc.	3.87A



Fig. (II-7). Module BP MSX 60.



- La figure ci-dessous présente le block du module photovoltaïque dans l'environnement SIMULINK :

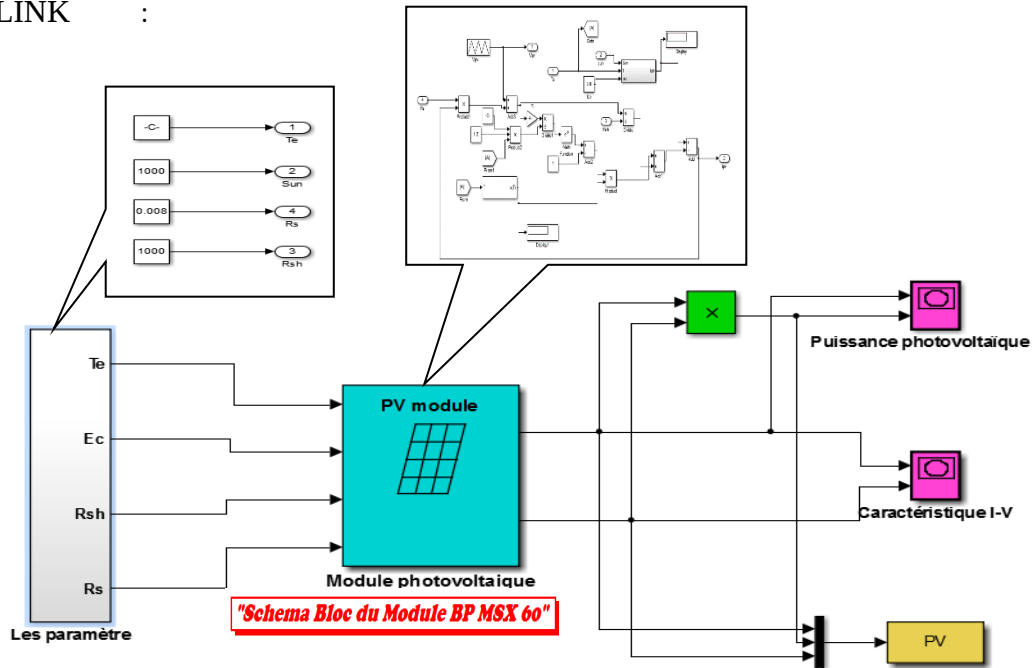


Fig. (II-8). Block du module BP MSX 60 dans SIMULINK.

II-2-4-2. Caractéristique courant- tension, puissance– tension :

Les figures (II.9), (II.10) représentent respectivement les courbes $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un module photovoltaïque dans des conditions constantes d'irradiation et de température. L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C .

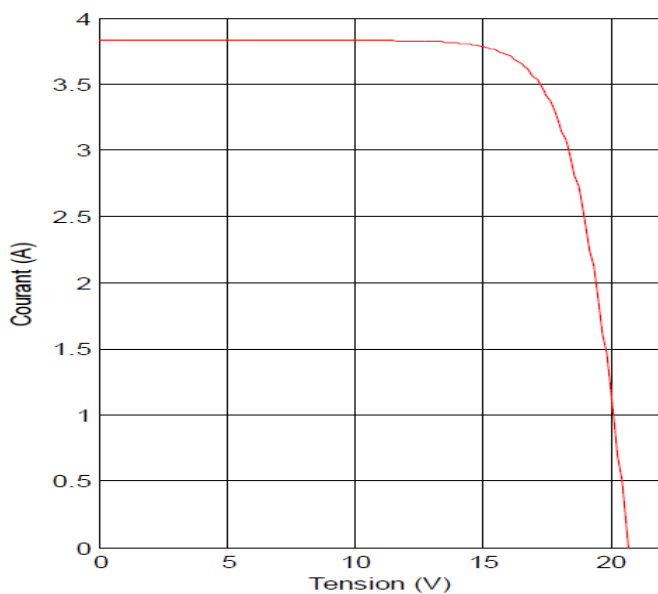


Fig. (II-9). Caractéristique courant-tension.

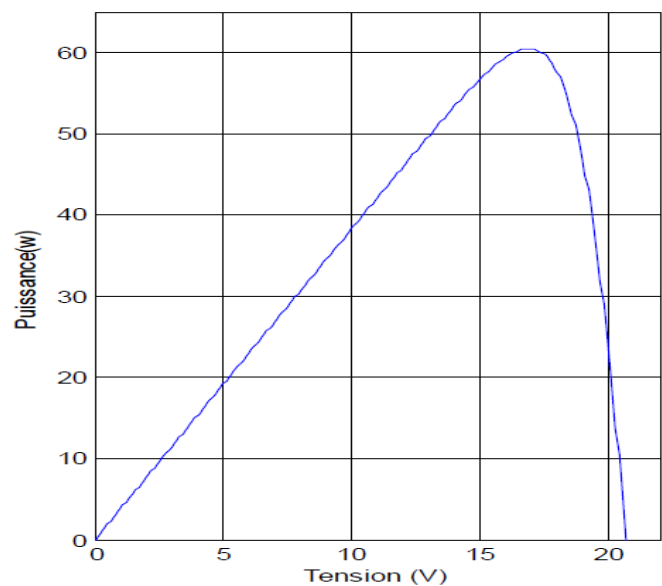


Fig. (II-10). Caractéristique puissance-tension.



Afin de voir le bon fonctionnement du modèle étudié, nous avons effectué des simulations suivant les effets des différents paramètres (la température et l'éclairement) sur les caractéristiques courant-tension.

II-2-4-3. Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température. [10]

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant ($G=1000\text{W/m}^2$) pour différentes température (25°C , 50°C , 75°C , 100°C).

La courbe des caractéristiques va présenter des différentes allures selon la température. On remarque que L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale **figure (II.11) et (II.12)**.

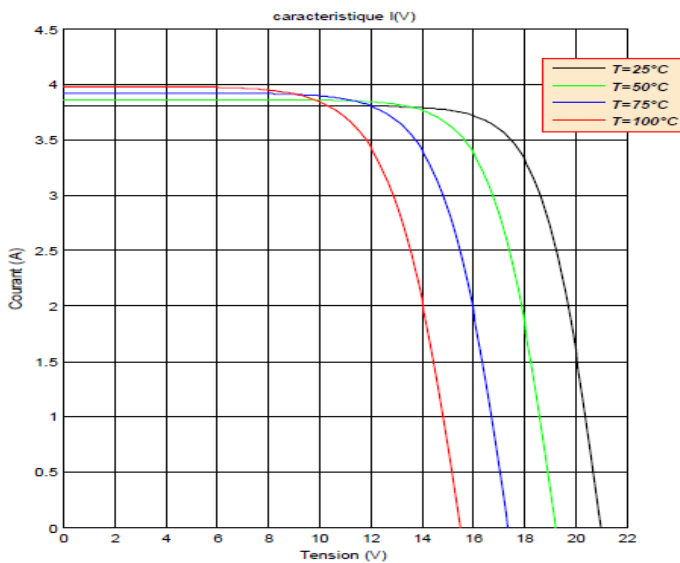


Fig. (II-11).Influence de la température sur I(V).

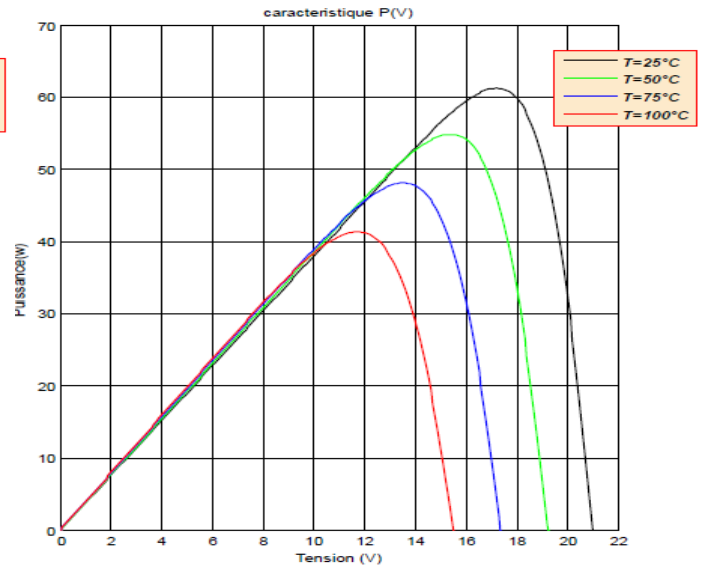


Fig. (II-12). Influence de la température sur P(V).

II-2-4-4. Influence de l'éclairement :

Par contre du cas précédant, lorsque nous avons maintenu une température constante (25°C) à différents éclairements .On remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit I_{cc} est une fonction linéaire de l'éclairement.

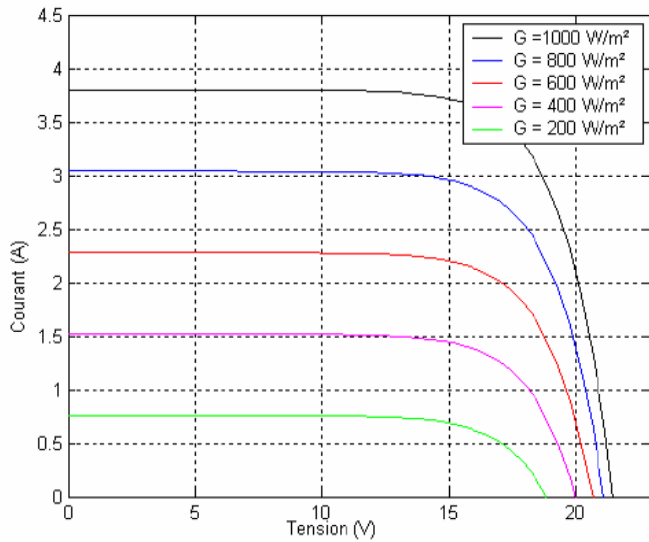
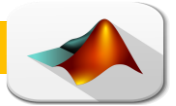


Fig. (II-13). Influence de l'éclairement sur I(V).

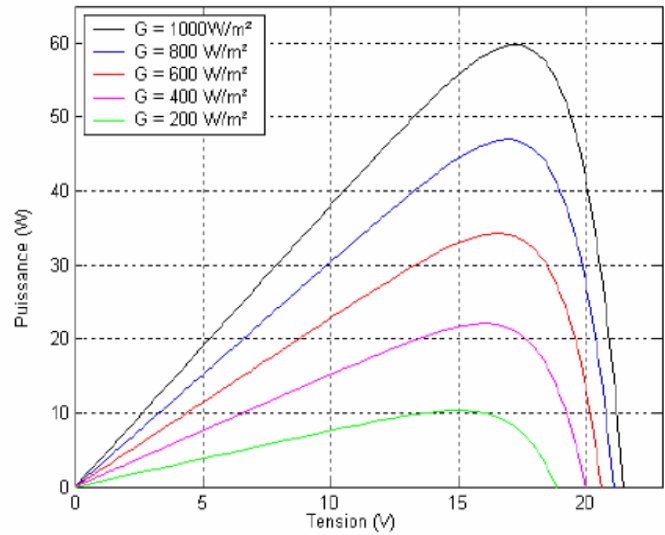


Fig. (II-14). Influence de l'éclairement sur P(V).

II-2-4-5. Influence de la résistance série :

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode qui se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée elle diminue la valeur du courant de court-circuit I_{cc} voir **figure (II.15)** et **(II.16)**.

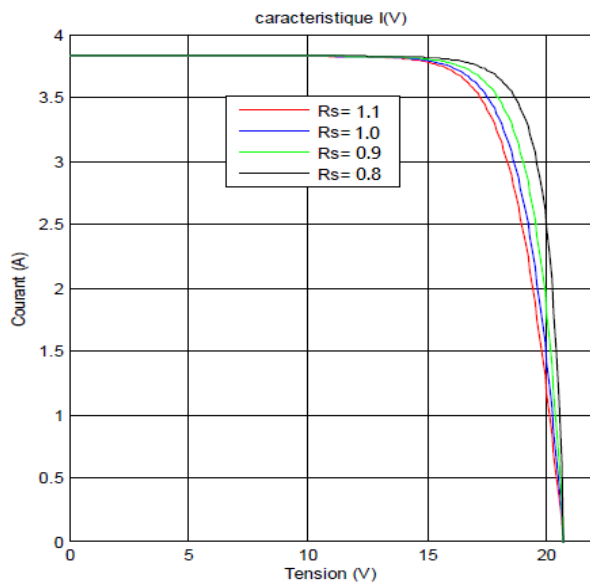


Fig. (II-15). Influence de la résistance série sur I(V).

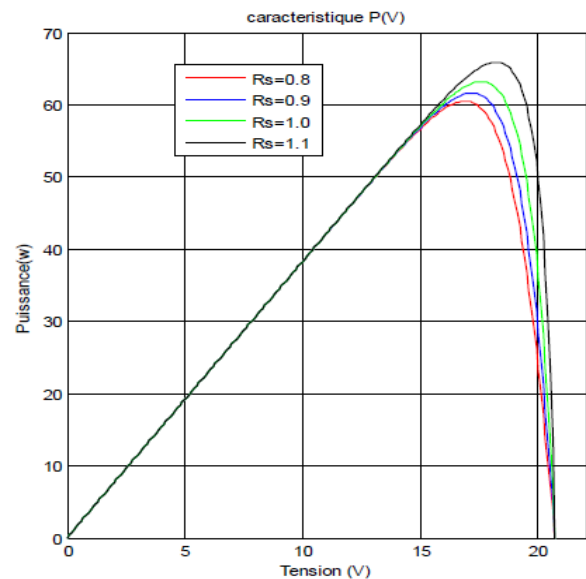


Fig. (II-16). Influence de la résistance série sur P(V).

II-2-4-6. Influence du facteur de qualité :

L'augmentation du facteur de qualité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement voir **figure (II.17)** et **(II.18)**.

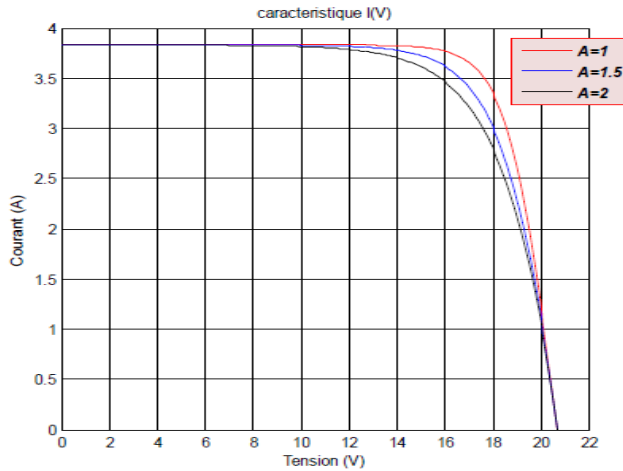


Fig. (II-17). Influence du facteur de qualité sur I(V)

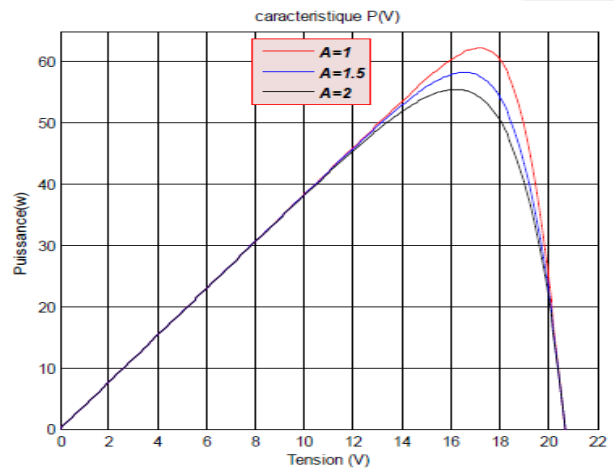


Fig. (II-18). Influence du facteur de qualité sur P(V)

II-2-4-7. L'influence de l'association en parallèle, série, mixte des modules :

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.

La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous **figure (II.19)**, ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Comme il est montré par la figure, ce genre de groupement augmente le courant ; la caractéristique équivalente sera alors celle d'une cellule.

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque.

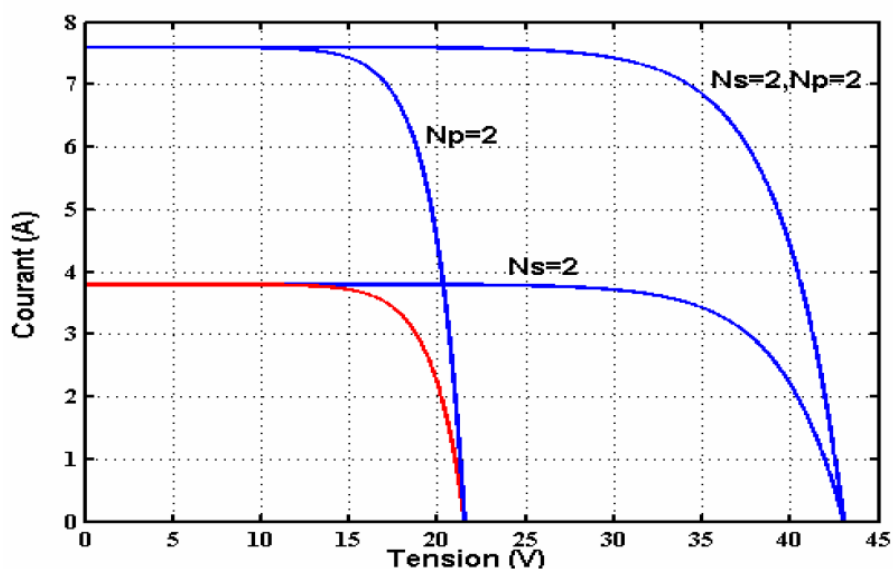


Fig. (II-19). L'influence de l'association des modules.



II-2-4-8. Zone de fonctionnement du module solaire :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe $I(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (II.20), représente trois zones essentielles :

- La zone (I) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant ;
- La zone (II) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé ;
- La zone (III) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension. [2]

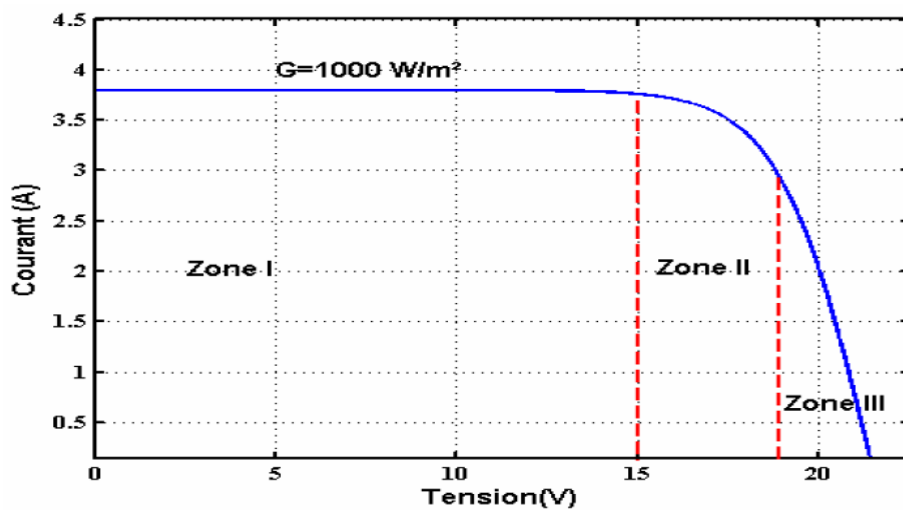


Fig. (II-20). Différentes zones de la caractéristique $I(V)$, $T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.



II-3. Modélisation du Hacheur

II-3-1. Les convertisseurs continu-continu (DC-DC) :

Les hacheurs sont des convertisseurs directs du type continu-continu, leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle, jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un « transformateur » de grandeurs électriques continues.

Si la tension et le courant (V_e et I_e) sont les grandeurs d'entrée du quadripôle, tension et le courant (V_s et I_s) les grandeurs de sortie, le hacheur introduit des relations entre ces grandeurs par l'intermédiaire de paramètres variables. Ces relations ne sont pas linéaires. Toutefois il sera possible d'établir des relations linéaires entre les valeurs moyennes de ces grandeurs qui permettront de caractériser l'échange de puissance moyenne contrôlée par le hacheur.

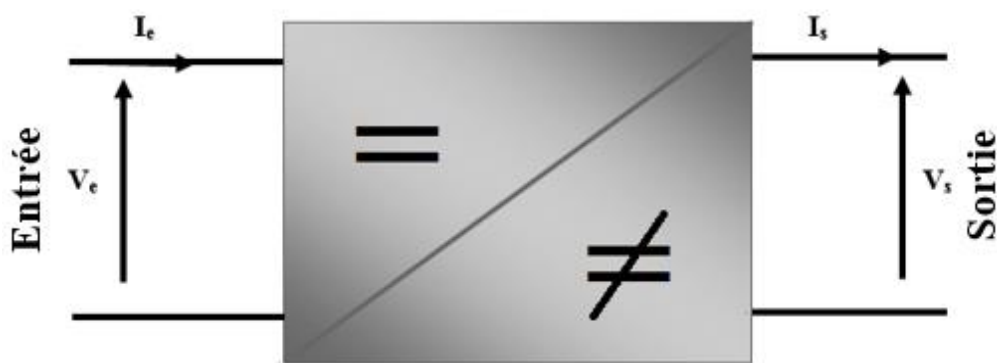


Fig. (II-21). Schéma de principe du hacheur.

II-3-1-1. Les méthodes d'étude des convertisseurs de puissance :

Pour chaque convertisseur de puissance, la méthode d'étude consiste essentiellement :

- à présenter les formes d'onde caractérisant le fonctionnement, éventuellement pour divers transferts de puissance ;
- à déduire les relations entre les valeurs moyennes ou efficaces des courants et des tensions en entrée et en sortie du convertisseur ;
- à envisager une commande du transfert de puissance ;
- à prévoir les composants à utiliser selon le type de conversion et la puissance nominale souhaitée. Il faut alors envisager les pertes dans ces composants ;



- à prévoir et à mettre en place les protections des composants et de l'ensemble du convertisseur.

II-3-1-2. Structures de base des convertisseurs DC-DC :

On considère dans la représentation des montages des hacheurs que :

- la source à l'entrée du convertisseur est une source de tension continue V_e ;
- la sortie est également considérée comme une source de tension continue V_s ;
- la charge est assimilable à une résistance R .

Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et des semi-conducteurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements.

Les semi-conducteurs sont :

- ▶ les diodes ;
- ▶ Les Interrupteurs commandables, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT. [6]

II-3-1-3. Les types de convertisseur DC-DC :

Il y a différents types de convertisseurs DC-DC. Une première distinction est à faire entre le convertisseur à isolement galvanique entre la sortie et l'entrée, et le convertisseur qui présente une borne commune entre l'entrée et la sortie (Notez que dans le cas de l'isolement galvanique le rendement se verra affecté d'au moins 10%, ce qui est inadmissible dans le cas par exemple des applications en énergie photovoltaïque). Dans les convertisseurs à stockage d'énergie, on distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs) :

- Les élévateurs (BOOST) dans lesquels $V_s > V_e$.
- Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_s < V_e$.
- Il y a aussi un type (BUCK-BOOST) : mélange entre les deux précédents.

Notre étude est consacrée sur le convertisseur DC-DC de type « BOOST » (parallèle). [11]

II-3-2. Le Principe de Fonctionnement du Hacheur « BOOST » :

Le convertisseur survolteur a pour rôle principal de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. Il est aussi appelé convertisseur élévateur de tension, Convertisseur « Boost » ou hacheur parallèle. [6]



II-3-2-1. Présentation du circuit :

Le schéma de principe d'un hacheur « Boost » est donné par **La figure (II.22)**. Cette structure est composée principalement d'une inductance **L**, condensateur **C** et de deux interrupteurs **K** et **D**. selon l'état de ces deux interrupteurs, on peut distinguer deux phases de fonctionnement :

- la **phase active** lorsque l'interrupteur **K** est fermé et l'interrupteur **D** est ouvert. Durant cette séquence, le courant traversant l'inductance **L** va augmenter linéairement et une énergie **W_L** est stockée dans **L**. Le condensateur **C** fournit de l'énergie à la charge **R**.

- la **phase de roue libre** lorsque l'interrupteur **K** est ouvert et l'interrupteur **D** est fermé. Durant cette séquence, l'énergie emmagasinée dans l'inductance **L** est restituée au condensateur **C** et à la charge **R**. Lors de cette phase, le fait que l'inductance **L** soit en série avec la source de tension d'entrée permet d'obtenir un montage survolteur.

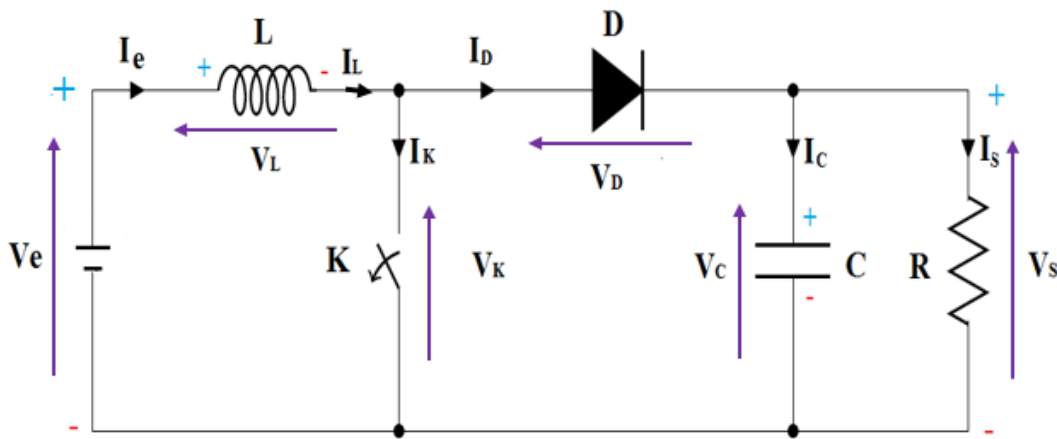


Fig. (II-22). Schéma de principe d'un hacheur Boost.

La figure (II.23) présente l'allure du signal de commande appliqué à l'interrupteur **K**. C'est un signal rectangulaire de fréquence « **f** » dont la largeur de la durée à l'état haut (durée de conduction de l'interrupteur **K**, notée **T_{ON}**) est ajustée par le paramètre **α** ce paramètre, appelé rapport cyclique, est défini comme étant le rapport entre la durée de conduction de l'interrupteur **K** et la période de découpage **T** de celui-ci :

- $T = 1/f$ (II-20)

- $\alpha = T_{ON}/T$ (II-21)

On a :

- $T = T_{ON} + T_{OFF}$ (II-22)

Où **T_{OFF}** correspond à la durée de blocage de l'interrupteur **K**.



La durée de conduction T_{ON} est compris entre 0 et T donc, le rapport cyclique est compris entre $[0 : 1]$ On peut exprimer la durée de conduction et de blocage de l'interrupteur K en fonction de α et T :

- Durée de conduction :

- $T_{ON} = \alpha.T$ (II-23)

- Durée de blocage :

- $T_{OFF} = (1 - \alpha) T$ (II-24)

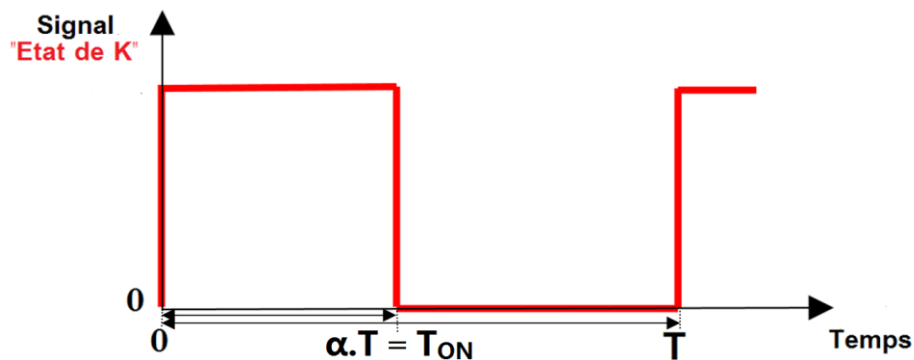


Fig. (II-23). Signal de commande de l'interrupteur K.

- Dans l'étude qui suit, nous ferons les hypothèses suivantes :
 - la tension d'alimentation V_e est parfaitement continue et constante ;
 - la valeur du condensateur C est suffisamment grande afin de pouvoir considérer la tension de sortie V_s comme continue ;
 - les composants sont idéaux.
- L'étude de la structure se fera en régime permanent. Dans ce cas on peut distinguer trois modes de conduction :
 - la **conduction continue** qui correspond au cas où le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais.
 - la **conduction discontinue** qui correspond au cas où le courant I_L traversant l'inductance s'annule avant la prochaine phase active.
 - la **conduction critique** qui définit la limite entre les deux modes de fonctionnement Précédents.

La suite de ce mémoire explique le comportement de la structure en fonction de la conduction continue. L'objectif principal est de déterminer les relations reliant les grandeurs



électriques d'entrée et de sortie du convertisseur ainsi que les formules permettant de dimensionner les différents composants.

II-3-2-2. Conduction continue :

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de **Les figures (II.24), (II.26)** on obtient les systèmes d'équations suivants :

► Séquence 1 : $[0 \text{ à } \alpha T]$ phase active « état passant » :

À l'instant $t = 0$, on ferme l'interrupteur **K** (MOSFET) pendant une durée αT .

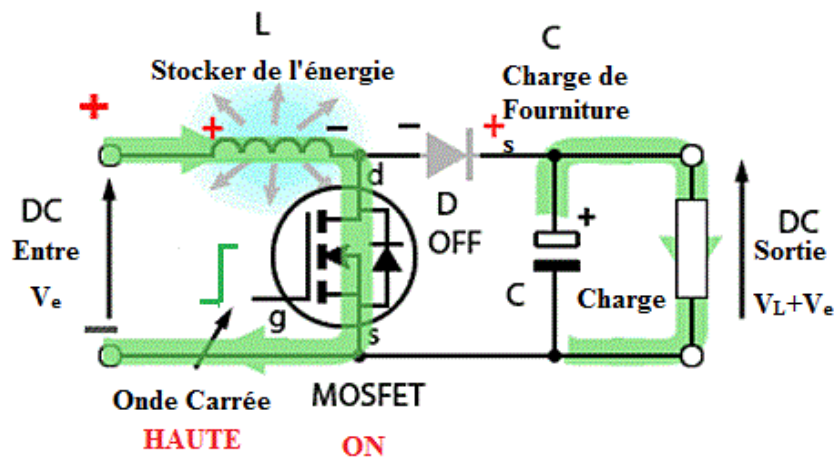


Fig. (II-24). Chemin actuel avec MOSFET ON.

-La tension aux bornes de la diode **D** est égale à :

$$\bullet \quad V_D = V_K - V_S \quad (II-25)$$

-Comme l'interrupteur **K** est fermé, on a $V_K = 0$, ce qui implique :

$$\bullet \quad V_D = -V_S \quad (II-26)$$

-La diode est donc bloquée puisque $V_S > 0$. [12]

L'inductance stocke le courant provenant de la source et la capacité maintient la tension de sortie utilisant l'énergie précédemment stockée. Pendant ce temps le courant I_L augmente.

-La tension aux bornes de l'inductance est alors : [11]

$$\bullet \quad V_L = V_e = L \frac{V_e - V_S}{L} < 0 \quad (II-27)$$

En résolvant cette équation différentielle, on obtient la formule suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

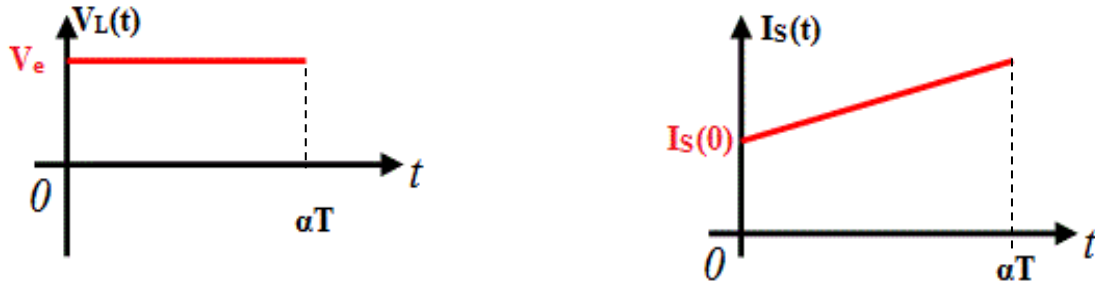


- $I_L = \frac{V_e}{L} t + I_{L\text{MIN}}$

(II-28)

- $I_C = -V_S / R$

(II-29)


 Fig. (II-25). Les formes d'ondes des V_L et I_s dans la premier Séquence.

► **Séquence 2 : $[\alpha T \text{ a } T]$ phase de roue libre « état bloqué » :**

À l'instant $t = \alpha T$, on ouvre l'interrupteur **K** (MOSFET) pendant une durée $T \times (1 - \alpha)$. Pour assurer la continuité du courant, la diode **D** entre en conduction. Lorsque l'interrupteur s'ouvre, l'interruption de courant dans l'inductance provoque une surtension qui s'ajoute à celle du condensateur.

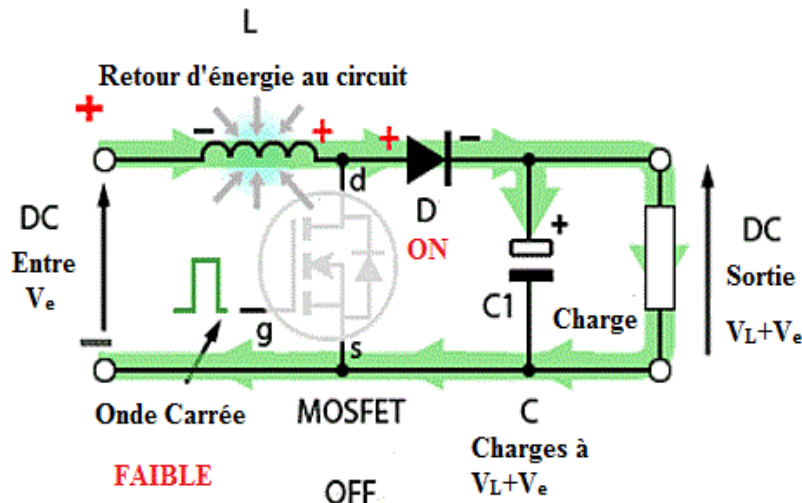


Fig. (II-26). Chemin actuel avec MOSFET désactivé.

-La tension aux bornes de l'inductance est alors :

- $V_L = V_e - V_S = L \frac{dI_L}{dt} < 0$

(II-30)

En résolvant cette équation différentielle, on obtient la formule suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

- $I_L = \frac{V_e - V_S}{L} (t - \alpha T) + I_{L\text{MAX}}$

(II-31)



- $I_C = I_L - I_S = I_L - (V_S / R)$

(II-32)

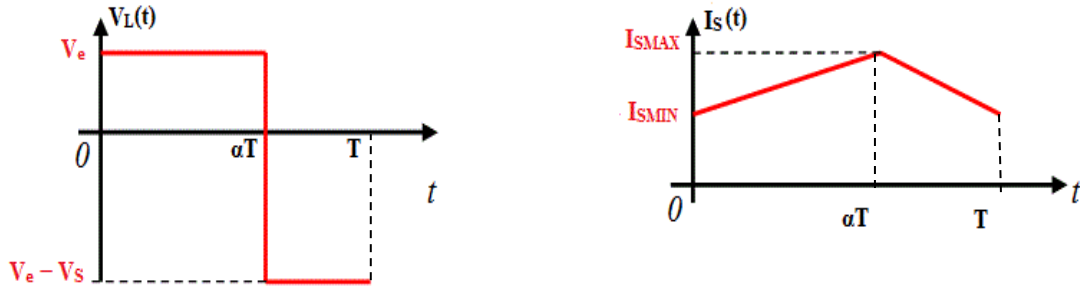


Fig. (II-27). Les formes d'ondes des V_L et I_S dans la deuxième Séquence.

II-3-2-2-1. Expression de V_S et I_S :

Par définition :

- $\langle V_L \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_L dt = \frac{1}{T} \left(\int_0^{aT} V_e dt + \int_{aT}^T (V_e - V_S) dt \right)$

(II-33)

Comme la tension moyenne aux bornes d'une inductance est nulle, on peut écrire :

- $\langle V_L \rangle = \alpha V_e + (V_e - V_S) (1 - \alpha) = 0$

(II-34)

Finalement, on obtient la relation suivante :

- $V_S = \frac{V_e}{(1 - \alpha)}$

(II-35)

Le rapport cyclique α est compris entre 0 et 1 donc la tension de sortie V_S est nécessairement supérieure à la tension d'entrée V_e .

Si on suppose que le courant d'entrée est parfaitement continu, on peut écrire :

- $I_S = I_S(t) = \frac{1}{T} \int_{aT}^T I_e dt$

(II-36)

Ce qui conduit à :

- $I_S = I_e (1 - \alpha)$

(II-37)

Cette expression montre que le hacheur « Boost » est abaisseur en courant.

Au regard de ces différentes expressions, on peut remarquer que le rapport cyclique α permet de régler la tension moyenne de sortie (respectivement le courant moyen de sortie) pour une tension moyenne d'entrée donnée (respectivement un courant moyen d'entrée). Il est donc



possible de régler le transfert moyen de puissance entre l'entrée et la sortie de la structure à partir du rapport cyclique α . Le transfert moyen de puissance est :

- $\langle P \rangle = (1 - \alpha) V_s \times I_e$ (II-38)

II-3-2-2-2. Ondulation de courant ΔI_L :

L'ondulation absolue du courant I_L est défini par $\Delta I_L = I_{LMAX} - I_{LMIN}$. A partir des relations (II-28) et (II-31), à $t = \alpha T$, on peut écrire :

- $\frac{V_e}{L} \alpha T + I_{LMIN} = I_{LMAX}$ (II-39)

On en déduit l'expression de ΔI_L suivante :

- $\Delta I_L = \frac{\alpha V_e}{Lf}$ (II-40)

Cette expression nous montre que l'ondulation en courant diminue lorsque la fréquence de commutation f ou la valeur de l'inductance L augmente.

Comme $V_e = V_s (1 - \alpha)$, on peut écrire :

- $\Delta I_L = \frac{\alpha(1 - \alpha) V_s}{Lf}$ (II-41)

En résolvant $d\Delta I_L / d\alpha = 0$, on trouve que l'ondulation en courant ΔI_L est maximale pour $\alpha = 0,5$. Le dimensionnement de l'inductance L , à partir d'une ondulation en courant donnée, s'effectue à l'aide l'équation suivante :

- $L \geq \frac{V_s}{4f \Delta I_L}$ (II-42)

II-3-2-2-3. Ondulation de tension ΔV_s :

Pour déterminer l'expression de l'ondulation en tension ΔV_s , on fait l'hypothèse que le courant I_s est parfaitement constant. On a la relation suivante :

- $I_C = C \frac{dV_s}{dt}$ (II-43)

Or, pour $0 \leq t \leq \alpha T$ on a $I_C = -I_s$. La résolution de cette équation différentielle donne :

- $V_s = -\frac{I_s}{C} t + V_{SMAX}$ (II-44)

$t = \alpha T$, on a :

- $V_s(\alpha T) = V_{SMIN} = -\frac{I_s}{C} \alpha T + V_{SMAX}$ (II-45)



Par suite, on a :

$$\bullet \quad \Delta V_s = V_{sMAX} - V_{sMIN} = \frac{I_s}{C} \alpha T \quad (II-46)$$

Finalement :

$$\bullet \quad \Delta V_s = \frac{\alpha V_s}{RCf} \quad (II-47)$$

Cette expression nous montre que l'ondulation en tension diminue lorsque la fréquence de commutation f ou la valeur du condensateur C augmente.

Le dimensionnement du condensateur C , à partir d'une ondulation en tension donnée, s'effectue à l'aide l'équation suivante :

$$\bullet \quad C \geq \frac{\alpha_{MAX} V_s}{R \Delta V_s f} \quad (II-48)$$

II-3-2-2-4. Formes d'ondes des principaux signaux :

Les formes d'ondes des principaux signaux sont données à **La figure (II.30)**. A partir de ces formes d'ondes, on peut exprimer les valeurs moyennes et efficaces des courants qui traversent la diode **D** et l'interrupteur **K**. Nous pouvons également en déduire les contraintes maximales en tension et courant sur les interrupteurs. Ces relations seront utilisées lors du dimensionnement des différents composants de la structure.

- Courant moyen traversant la diode **D** :

$$\bullet \quad \langle I_D \rangle = I_s \quad (II-49)$$

- Courant efficace traversant la diode **D** :

$$\bullet \quad I_{Deff} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_s}{(1 - \alpha)}\right)^2 + \frac{\Delta I_L^2}{12}\right)(1 - \alpha)} \quad (II-50)$$

- Courant moyen traversant l'interrupteur **K** : [12]

$$\bullet \quad I_K = \frac{I_s}{(1 - \alpha)} = I_e \quad (II-51)$$

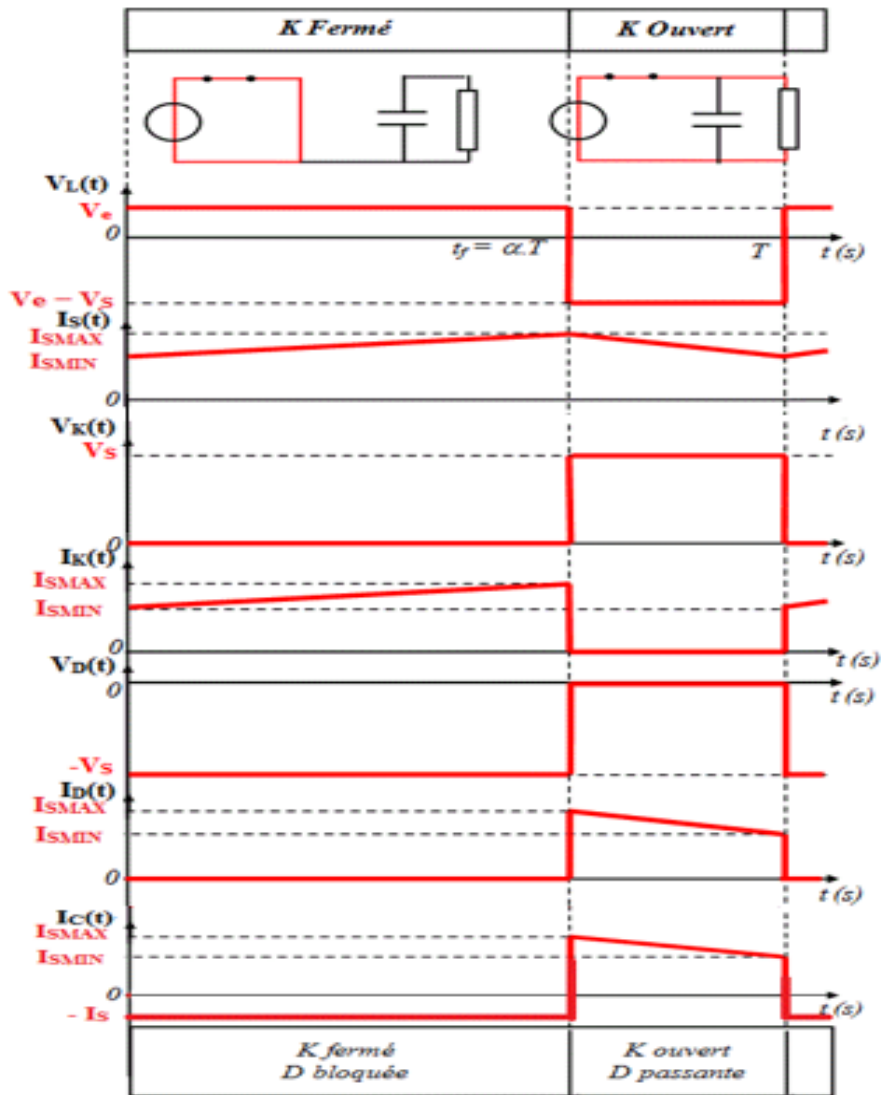


Fig. (II-28). Formes d'ondes obtenues en conduction continue. [13]

Les contraintes en tension et courant sur l'interrupteur commandé **K** et la diode **D** sont les mêmes. Ces caractéristiques statiques extrêmes sont utilisées pour choisir les composants de la cellule de commutation. Il faut choisir des composants dont l'aire de sécurité englobe ces valeurs (absoluté maximum ratings). L'aire de sécurité d'un composant correspond au domaine courant-tension à l'intérieur duquel le point de fonctionnement doit demeurer. Cependant, ce point de fonctionnement peut exceptionnellement sortir de manière impulsionnelle (il convient alors de vérifier que le composant concerné tolère ces écarts).

-Contraintes maximales en tension :

$$\bullet \quad V_{KMAX} = |V_{DMAX}| = V_{SMAX} = \frac{V_e}{(1 - \alpha)} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (II-52)$$



-Contraintes maximales en courant :

$$\bullet \quad I_{KMAX} = I_{DMAX} = I_{LMAX} = \frac{I_s}{(1 - \alpha)} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (II-53)$$

Le dimensionnement de la cellule de commutation s'effectue dans le cas le plus défavorable. Pour calculer les contraintes en tension et courant dans le pire des cas, il faut remplacer dans les expressions ci-dessus α par α_{MAX} .

II-3-2-2-5. Limitation du gain en tension :

Le gain en tension défini précédemment pour cette structure tend théoriquement vers l'infini pour un rapport cyclique unitaire. En réalité, ce gain est limité par la résistance série de l'inductance. Cette résistance série est notée **ESR** (Equivalent Série Résistance) dans la documentation constructeur. En notant R_L la résistance série de l'inductance, on peut écrire, en valeur moyenne :

$$\bullet \quad V_e = R_L \times \langle I_L \rangle + \langle V_K \rangle \quad (II-54)$$

Or :

$$\bullet \quad \langle V_K \rangle = (1 - \alpha) V_s \quad (II-55)$$

et

$$\bullet \quad \langle I_L \rangle = \frac{V_s}{R(1 - \alpha)} \quad (II-56)$$

Ce qui conduit à :

$$\bullet \quad V_e = \frac{R_L}{R(1 - \alpha)} V_s + (1 - \alpha) V_s \quad (II-57)$$

Finalement :

$$\bullet \quad \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{(1 - \alpha) \left[1 + \frac{R_L}{R} \frac{1}{(1 - \alpha)^2} \right]} \quad (II-58)$$

On peut voir sur **La figure (II.29)**. Que cette courbe n'est pas continûment croissante. Elle atteint un maximum pour :

$$\bullet \quad \alpha_L = 1 - \sqrt{\frac{R}{R_L}} \quad (II-59)$$

Dans ce cas, le gain en tension maximal est donné par la formule suivante :

$$\bullet \quad [V_s/V_e]_{MAX} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R}{R_L}} \quad (II-60)$$



De plus, on peut remarquer que si $\alpha > \alpha_L$, le gain en tension retombe alors rapidement à zéro. En pratique, il n'est donc pas possible d'obtenir des rapports d'élévation en tension quelconques.

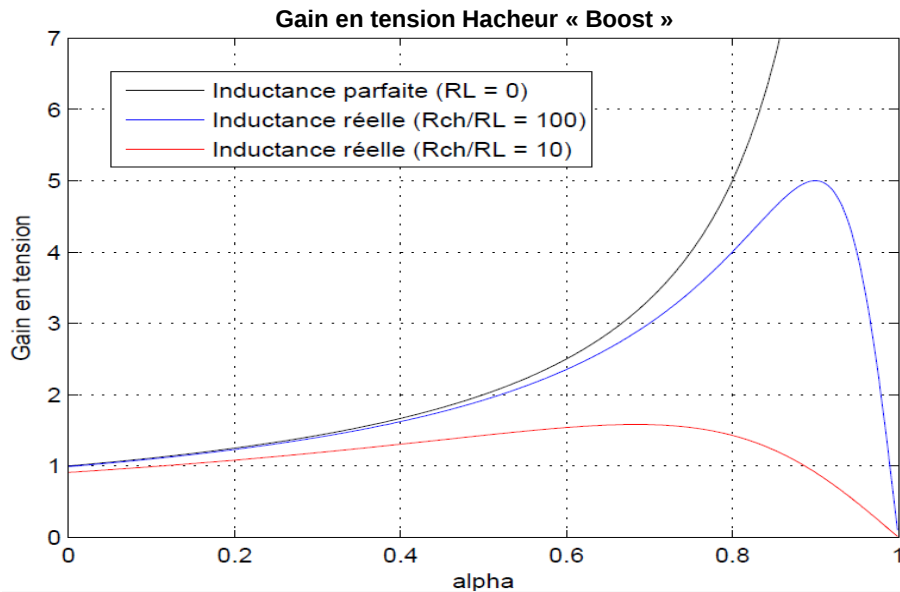


Fig. (II-29). Caractéristiques de transfert paramétrées par R_L .

II-3-2-3. Dimensionnement des composants :

II-3-2-3-1. Cahier des charges :

Les spécifications minimales pour pouvoir réaliser un hacheur boost, avec la méthode de dimensionnement exposée dans ce document, sont les suivantes :

- Tension d'entrée V_e ;
- Courant d'entrée I_e ;
- Tension de sortie variant entre V_{SMIN} et V_{SMAX} ;
- Courant de sortie I_s ;
- L'ondulation relative de tension $\frac{\Delta V_s}{V_s} \leq XX \%$;
- Fréquence de hachage f .

A partir de ces spécifications, on peut établir :

$$\bullet \quad \alpha_{MAX} = \frac{V_{SMAX} - V_e}{V_{SMAX}} \quad (II-61)$$

$$\bullet \quad \alpha_{MIN} = \frac{V_{SMIN} - V_e}{V_{SMIN}} \quad (II-62)$$



Tableau (II -2). Les valeurs de cahier des charges

Grandeurs	Valeur
V_e	12V
I_{eMAX}	3A
V_{sMIN}	15V
V_{sMAX}	35V
I_{sMAX}	2.4A
f	1 kHz
α_{MIN}	20%
α_{MAX}	66%
$\frac{\Delta V_s}{V_s} \leq$	$4 \times 10^{-3}\%$

II-3-2-3-2.Cellule de commutation :

La cellule de commutation est composée de deux interrupteurs :

- l'interrupteur **D** doit supporter une tension inverse et doit pouvoir conduire un courant positif. Son amorçage et son blocage peuvent être spontanés. Cet interrupteur sera donc une diode.
- l'interrupteur **K** doit supporter une tension positive et doit pouvoir conduire un courant positif. Les commutations de cet interrupteur doivent être commandées. Cet interrupteur pourra être de type transistor. [12]

► Choix de la diode D :

La diode utilisée doit être extrêmement rapide. Les pertes par recouvrements inverses sont générées par ses diodes, en conséquence, plus elles seront bonne, moins il y aura de pertes.

Notre choix s'est porté sur des diodes de chez "1N4007 HY". Ce sont des diodes peu couteuses et rapides. [14]

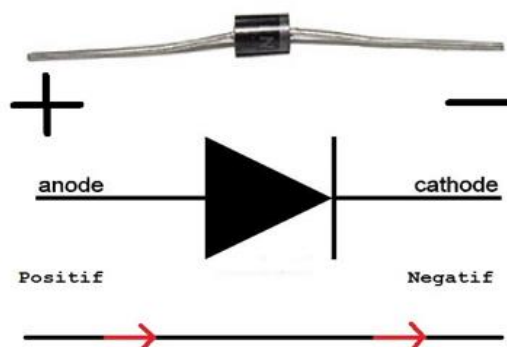


Fig. (II-30). La diode.



Les principaux critères de choix pour une diode sont les suivants :

- Courant moyen $I_{F(AV)}$;
- Courant crête I_{FSM} ;
- Tension inverse V_{RRM} .

Tableau (II -3). Caractéristiques de diode "1N4007 HY"

Grandeurs	Valeur
$I_{F(AV)}$	1A
I_{FSM}	30A
V_{RRM}	1000V

► Choix de l'interrupteur K :

Le tableau, présenté à la **figure (II.31)** permet de choisir le type de technologie à utiliser en fonction de la puissance nominale et la fréquence de découpage auxquelles est soumis le composant.

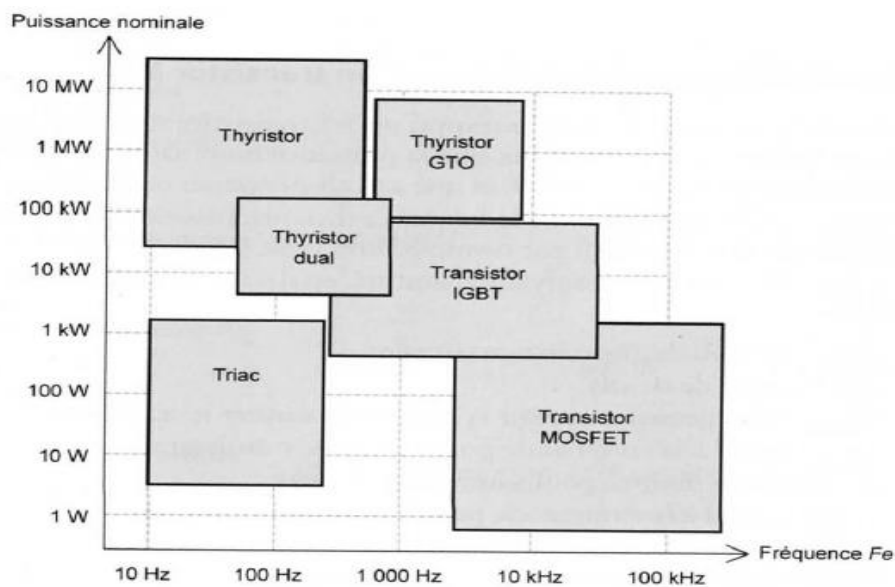
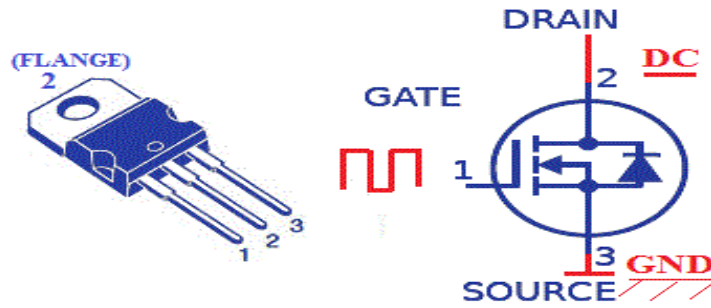


Fig. (II-31). Diagramme puissance-fréquence des composants.

Cette figure nous montre que le transistor Mosfet est bien adapté pour le hacheur « Boost » basse/moyenne puissances fonctionnant avec une grande fréquence de commutation. C'est pourquoi, dans la suite de ce document, nous considérerons que l'interrupteur **K** est un **transistor-Mosfet "IRF830N"**.



IRF830



N-Channel

Fig. (II-32). Symbole de transistor –MOSFET "IRF830N".

Les principaux critères de choix pour un **transistor-Mosfet** sont les suivants :

- V_{DSS} : Tension drain-source maximale ;
- I_{DS} : Courant de drain ;
- $R_{DS(on)}$: Résistance drain-source à l'état passant (pertes en conduction) ;
- $Q_{G(on)}$: Charge nécessaire sur la grille pour saturer le transistor ;
- $t_{d(on)}$: Retard à la commande pour saturer le transistor ;
- t_r : Temps de montée pour saturer le transistor ;
- $t_{d(off)}$: Retard à la commande pour bloquer le transistor ;
- t_f : Temps de descente pour bloquer le transistor. [12]

Tableau (II -4). Caractéristiques de transistor-Mosfet "IRF830N".

Grandeurs	Valeur
V_{DSS}	500 V
I_{DS}	4.5A
$R_{DS(on)}$	1.5 Ω
$Q_{G(on)}$	22 nC
$t_{d(on)}$	11.5ns
t_r	8 ns
$t_{d(off)}$	7 ns
t_f	8 ns

Un surdimensionnement, d'un facteur **1.2** à **2**, est à prévoir pour le calibre en tension et en courant (V_{DSS} et I_{DS}). On peut estimer la fréquence maximale de commutation envisageable " f_{max} " à partir de la relation suivante :



$$\bullet \quad T_{\min} = 100 \times (t_{d(\text{on})} + t_r + t_{d(\text{off})} + t_f)$$

(II-63)

On a alors :

$$\bullet \quad f_{\max} \leq \frac{1}{T_{\min}}$$

(II-64)

Pour un transistor –MOSFET " **IRF830N** " :

- $T_{\min} = 3.15 \times 10^{-6} \text{ s.}$
- $f_{\max} \leq 317 \text{ KHz.}$

II-3-2-3-3. Interface de commande :

Ce circuit réalise l'interface entre les circuits de commande et les composants de puissance. Ces caractéristiques essentielles sont : isolement galvanique (protection des circuits de commande et possibilité de transmettre des signaux pour des composants fonctionnant à des potentiels différents) ; retard à la transmission du signal de commande le plus faible possible (permettre un fonctionnement en haute fréquence) ; génération de signaux adaptés pour la commande en puissance.

II-3-2-3-4. Éléments réactifs :

► Inductance L :

Le calcul de l'inductance débute par le calcul du courant d'entrée maximal. On impose la fréquence de découpage en haute fréquence et on vérifie si l'ondulation de courant est correcte en basse fréquence.

Après calculs, l'inductance peut se trouver dans le marché ou bien être fabriquée.

$$L \geq \frac{0.66(1-0.66)35}{2 \times 2.4 \times 1000}$$

$$L \geq 1.636 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$L \geq 1.636 \text{ mH}$$

Après calcul, la self utilisée doit faire au minimum **1.636 mH** dans notre cas. Une valeur plus importante permettrait de diminuer l'ondulation.

Dans notre cas, nous utilisons l'inductance de bobine primaire du transformateur.

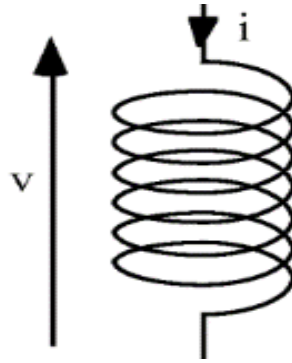


Fig. (II-33). L'inductance de bobine.

➤ La méthode de mesure et calcule l'inductance de la bobine :

La figure (II.34) explique le schéma de montage de cette méthode. Nous changeons la valeur de la fréquence jusqu'à ce que nous obtenions la même tension dans le premier et le second voltmètre. [15]

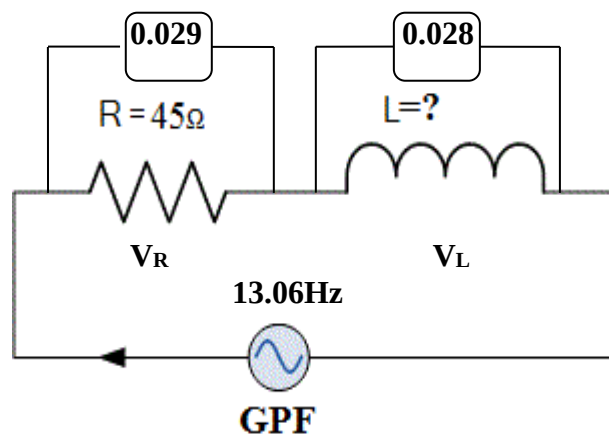


Fig. (II-34). Schéma de mesure l'inductance de bobine.

On peut interpréter ce résultat dans les relations suivantes :

$$V_R = V_L$$

$$\bullet \quad R.I = \omega.L.I \quad (II-65)$$

Alors :

$$\bullet \quad R = 2 \pi.f.L \quad (II-66)$$

$$L = \frac{45}{2 \times 3.14 \times 13.06}$$

$$L = 0.549 \text{ H}$$

$$L = 549 \text{ mH}$$

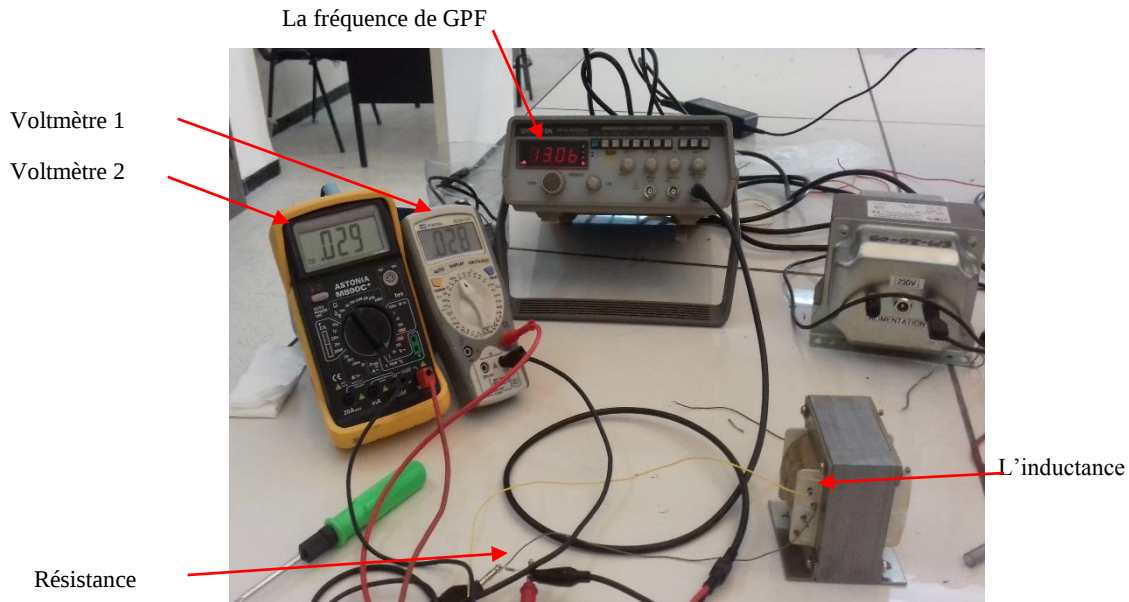


Fig. (II-35). Réalise le circuit de mesure l'inductance de bobine.

► Condensateur C :

Le rôle de ce condensateur est de diminuer l'ondulation de la tension de sortie du convertisseur. En général, pour des applications de filtrage en tension basse fréquence, on utilise des condensateurs électrolytiques. Ces condensateurs sont polarisés, il faut donc faire attention à leur sens de connexion. Il est possible de réaliser des associations série-parallèle pour obtenir des puissances importantes.

Les critères de choix d'un condensateur sont les suivants :

- la capacité nominale et sa tolérance
- la tension admissible à ses bornes

La capacité du condensateur est calculée à partir de l'expression (II-48) :

- $C \geq \frac{\alpha_{\text{MAX}} V_s}{R \Delta V_s f}$
- $C \geq 0.0017F$

Dans notre cas, nous utilisons un condensateur de sortie **2200 μ F, 35V** suffit pour obtenir une tension de sortie continue acceptable.



Fig. (II-36). Un condensateur 2200 μ f, 35V.



II-3-3. Simulation du Hacheur « Boost » :

Nous avons utilisé les valeurs précédentes pour simuler le hacheur « Boost » dans le Matlab.

II-3-3-1. Schéma bloc :

Voici un schéma de circuit utilisé pour la simulation Matlab du convertisseur boost. Le but de ce circuit est de mesurer la tension de sortie et la forme d'onde de courant.

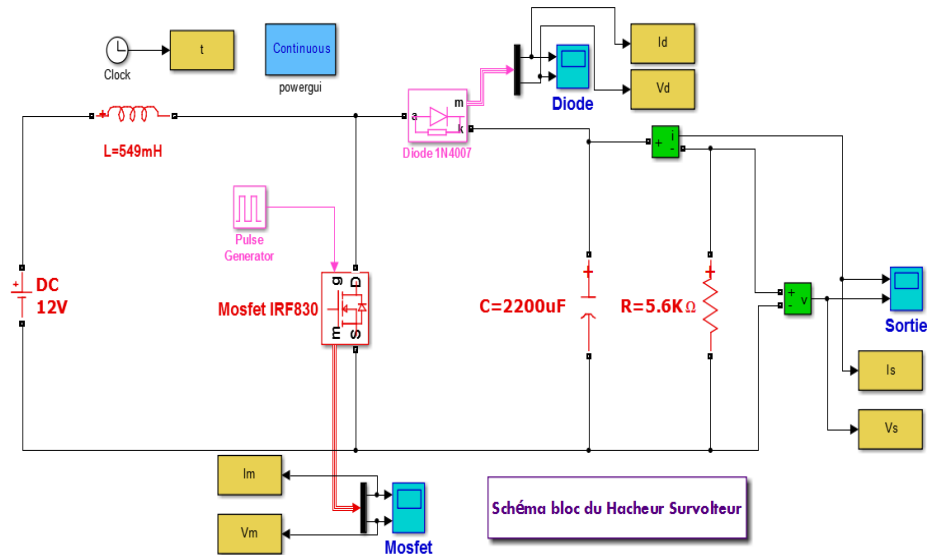


Fig. (II-37). Schéma bloc du hacheur «Boost».

II-3-3-2. Résultats de simulation :

Les figures suivantes représentent les allures des paramètres : V_K , I_K , V_D , I_D , V_S et I_S .

- La figure (II.38) représente la tension de Mosfet V_K , pour $R=5.6k$ et $\alpha_{max}=66\%$

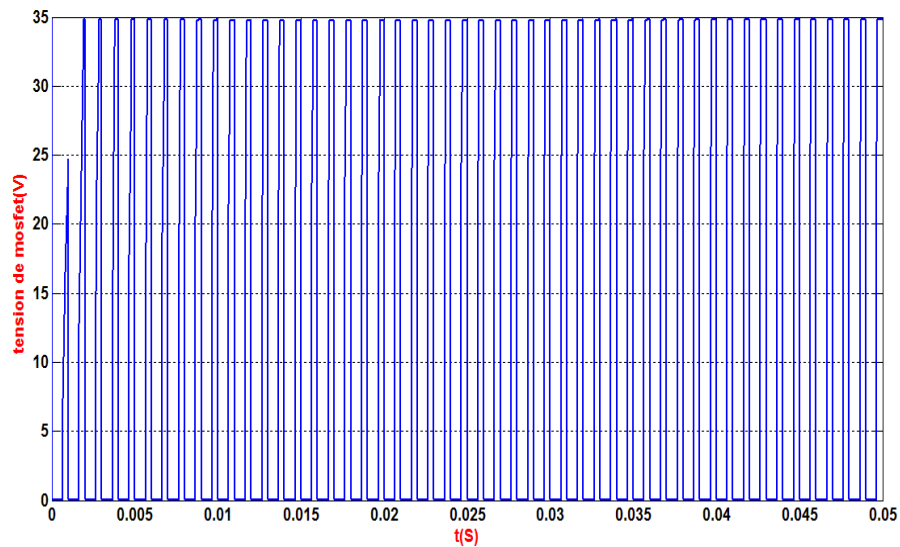


Fig. (II-38). Allure de tension du Mosfet V_K .



- La figure (II.39) représente le courant de Mosfet I_K , pour $R=5.6k$ et $\alpha_{max}=66\%$

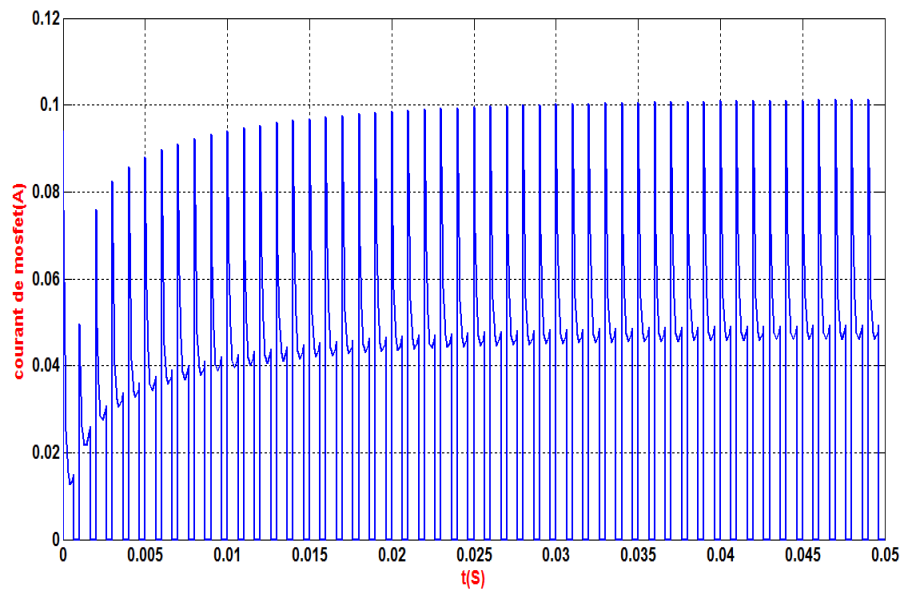


Fig. (II-39). Allure du courant du Mosfet I_K .

- La figure (II.40) représente la tension de diode V_D , pour $R=5.6k$ et $\alpha_{max}=66\%$

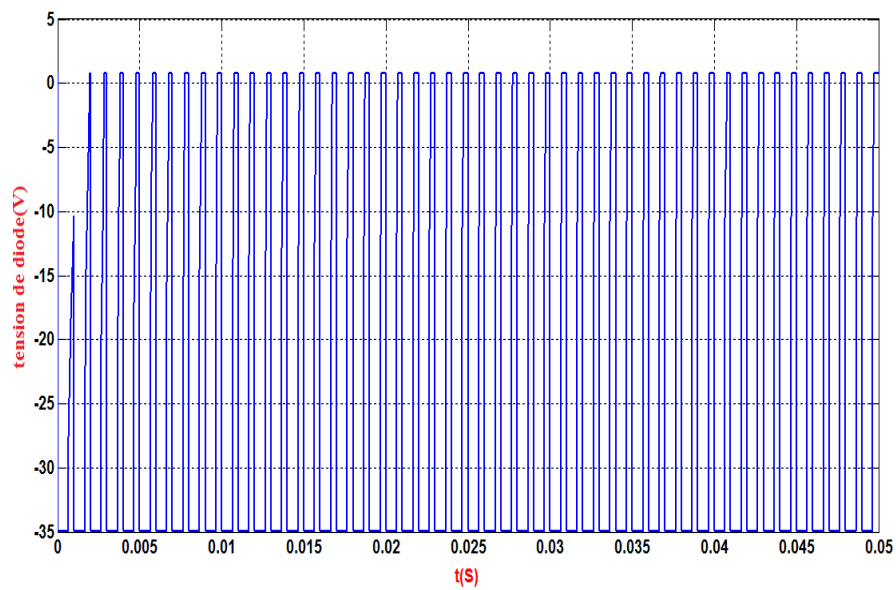


Fig. (II-40). Allure de la tension de diode V_D .



- La figure (II.41) représente le courant de diode I_D , pour $R=5.6k$ et $\alpha_{max}=66\%$

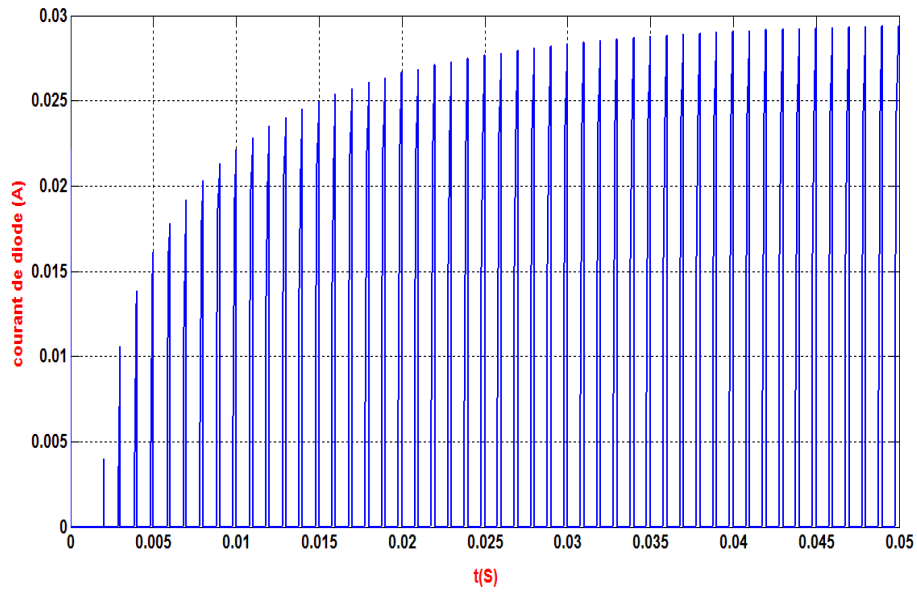


Fig. (II-41). Allure du courant de diode I_D .

- La figure (II.42) représente la tension de sortie V_s , pour $R=5.6k$ et $\alpha_{max}=66\%$

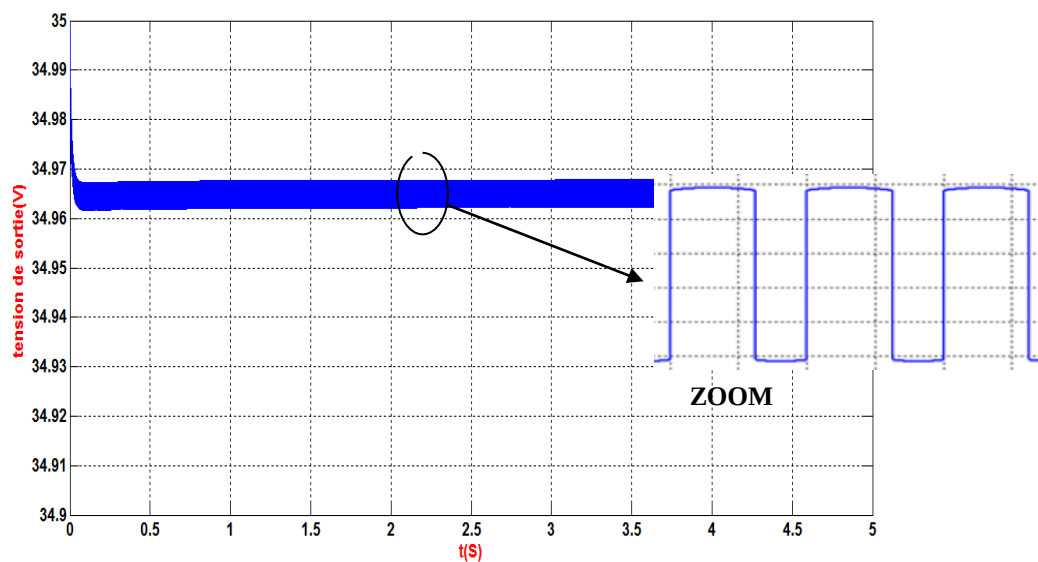


Fig. (II-42). Allure de la tension de sortie V_s .



- La figure (II.43) représente le courant de sortie I_s , pour $R=5.6k$ et $\alpha_{max}=66\%$

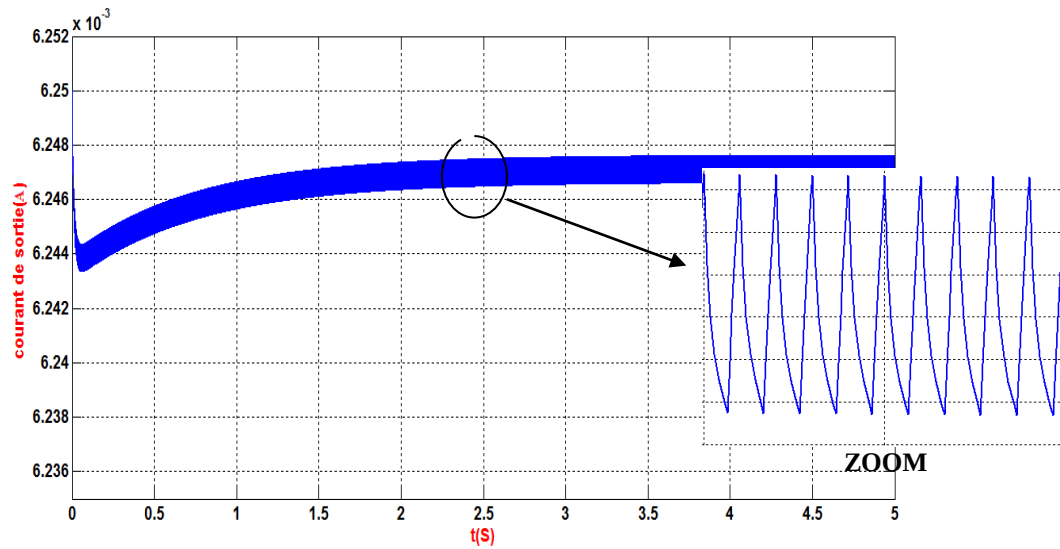


Fig. (II-43). Allure de le courant de sortie I_s

- La figure (II.44) représente la tension de sortie V_s , pour $R=5.6k$ et $\alpha_{min}=20\%$

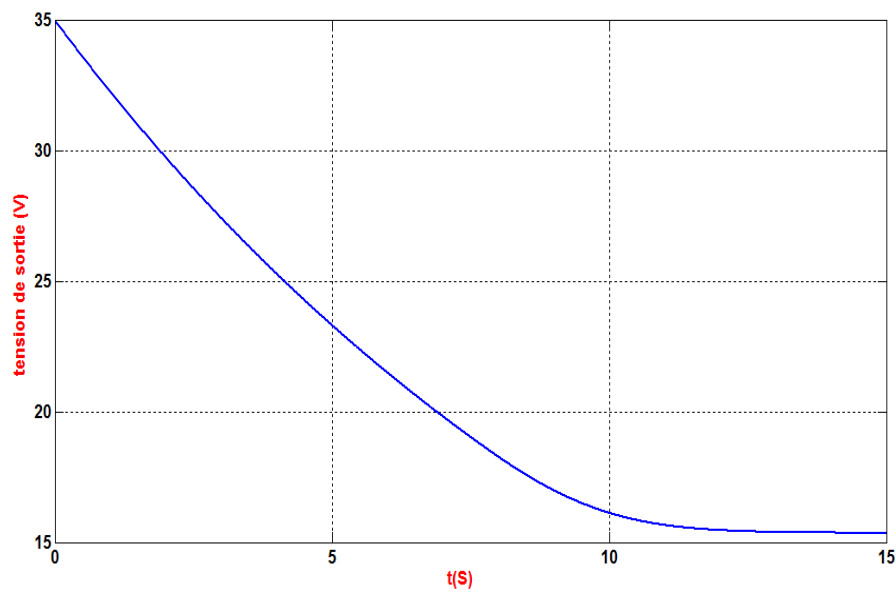


Fig. (II-44). Allure de la tension de sortie V_s .



- La figure (II.45) représente le courant de sortie I_s , pour $R=5.6k$ et $\alpha_{max}=20\%$

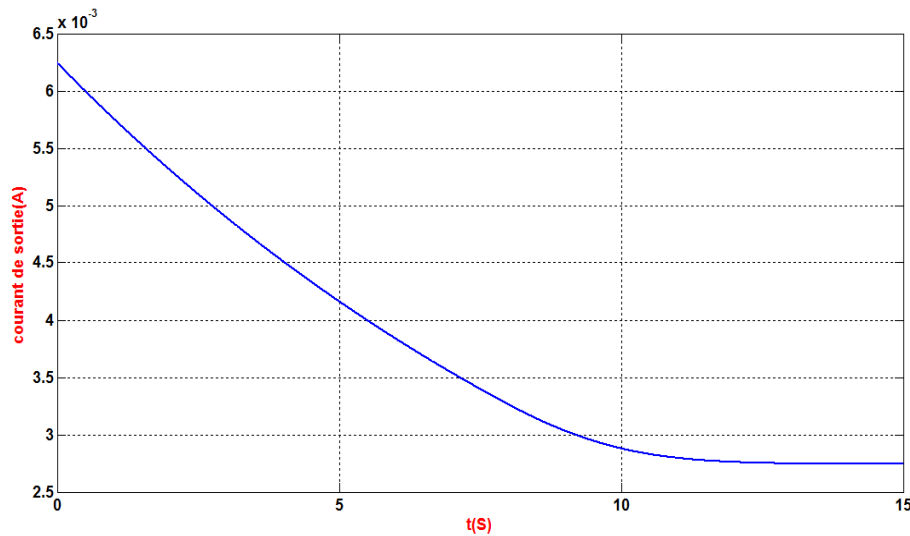


Fig. (II-45). Allure de le courant de sortie I_s .

Les résultats de simulation montrent que la tension de sortie illustrée par La figure (II.42), (II.44) est conforme à celle calculée théoriquement. La tension d'entrée est proche de leur valeur calculée théoriquement, ceci est dû à l'influence des pertes dans les composants de puissances non prisent en compte lors du dimensionnement des convertisseurs.

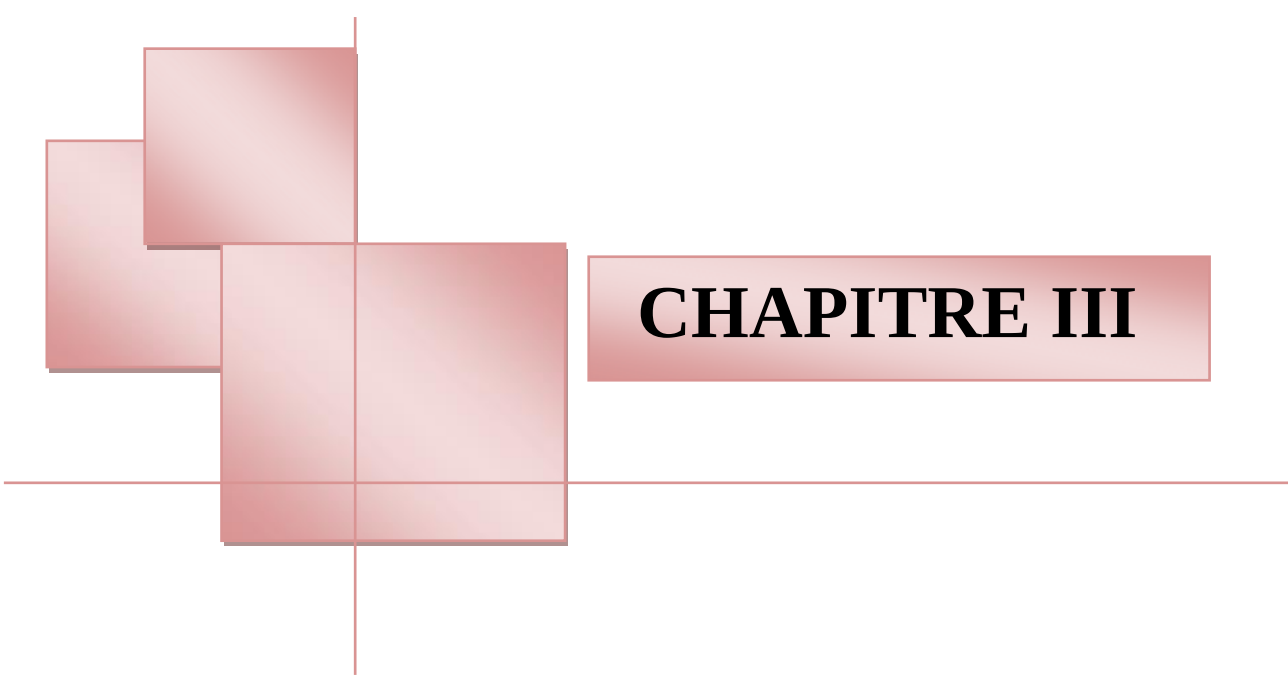
II-4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques électriques fondamentales d'une cellule PV et aussi pour un GPV (Générateur photovoltaïque) et les circuits équivalents ont été décrit. Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique $I=f(V)$ non linéaire.

Nous avons vu sur Matlab l'effet des changements climatiques sur les caractéristiques ($I(V)$ et $P(V)$) de la cellule PV.

Ainsi dans ce chapitre, nous avons détaillé l'étude théorique sur le convertisseur DC-DC de type « Boost » dans la conduction continue pour obtenir les relations entre les déférents paramètres nécessaires du convertisseur,

Aussi on a présenté la méthode à suivre pour dimensionner un hacheur survolteur et la simulation du ce convertisseur.



CHAPITRE III

Commande du Hacheur à L'aide de La carte Arduino



Promotion 2017



III -1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons détaillé comment réaliser la carte électronique de hacheur "Boost " commandée par l'association de logiciel Matlab avec la carte Arduino à partir la technique MLI. Ce hacheur est alimenté par le panneau solaire.

Après avoir donné dans les chapitres précédents une description théorique sur le hacheur "Boost" et le système photovoltaïque, on va procéder à l'application expérimentale. Pour cette raison, plusieurs blocs ont été nécessaires afin de réaliser une telle combinaison avec la carte Arduino et son environnement de développement.

III -2. Structure de Commande du Hacheur :

La qualité de la tension de sortie d'un hacheur dépend largement de la technique de commande utilisée pour commander les interrupteurs de ce hacheur. Il existe plusieurs techniques de commande et le choix d'une technique parmi toutes les possibilités dépend essentiellement du type d'application auquel l'appareil est désigné.

La technique la plus utilisée dans les variateurs de la tension d'alimentation est la commande par modulation de largeur d'impulsion « **MLI** », ou Pulse Width Modulation « **PWM** ». [18]

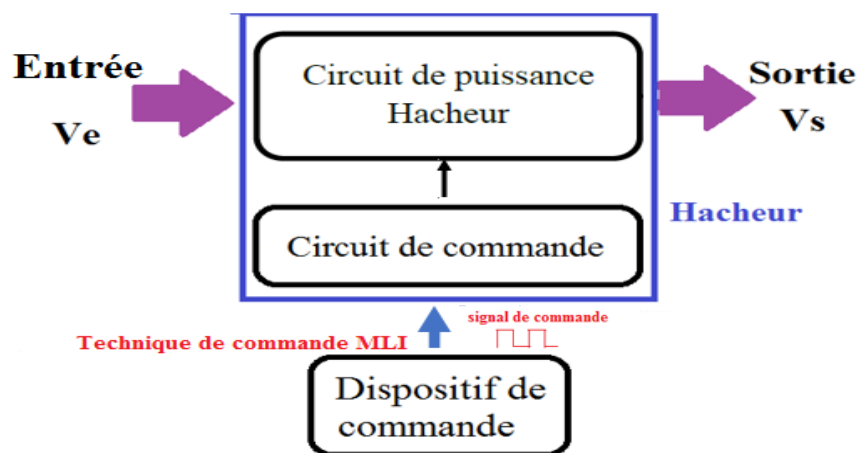


Fig. (III-1). Structure de commande du hacheur.

III -2-1. Génération d'une MLI (PWM) :

La modulation de largeur d'impulsion est un signal à période constante mais à rapport cyclique réglable. La MLI (ou PWM) est utilisée dans la famille des variateurs de fréquence : les cyclo-convertisseurs, les onduleurs, les redresseurs et les hacheurs.

Le développement considérable de la technique de modulation en largeur d'impulsion ouvre une large étendue d'application dans les systèmes de commande et beaucoup d'autres fonctions. Elle permet une réalisation souple et rentable des circuits de commande des hacheurs



III -2-2. Principe de la commande MLI :

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion mli est fondé sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi, la tension de sortie est formée par une succession de créneau d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la production d'un signal MLI est de comparer entre deux signaux :

- Le premier, appelé signal de référence, est un signal continue ;
- Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques du convertisseur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence. [19]
- L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs

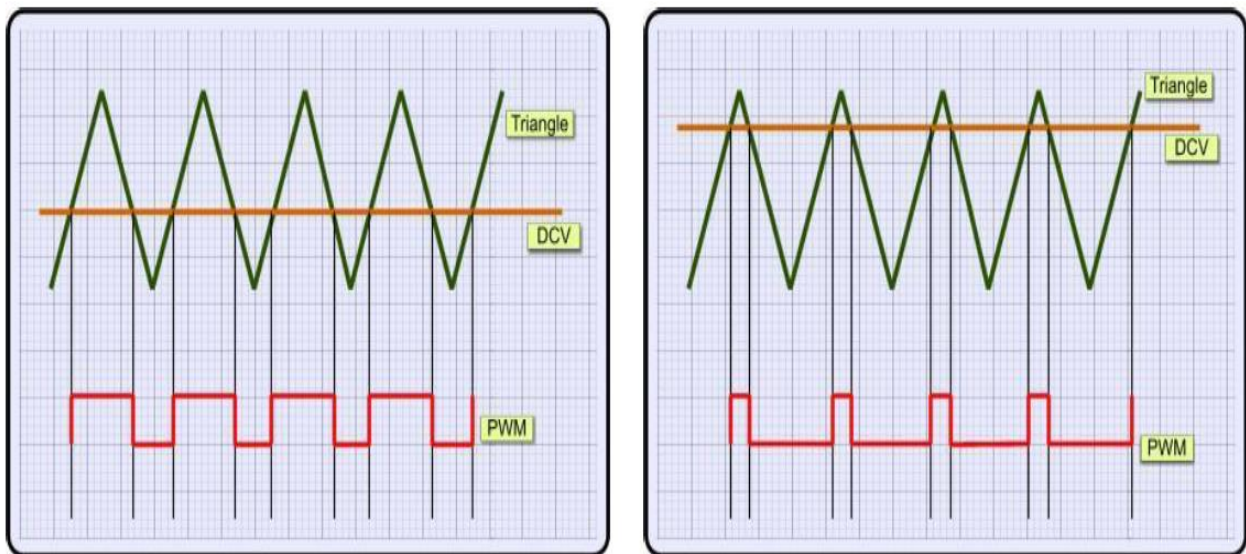
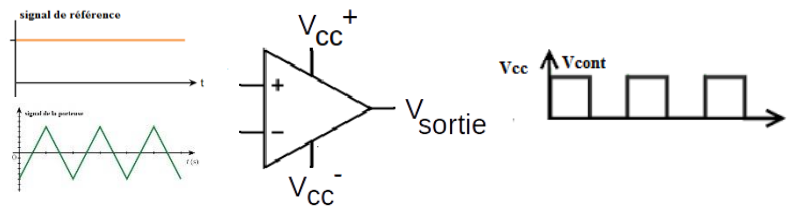


Fig. (III-2). Un signal MLI (PWM).

L'intersection de la référence avec la porteuse, en sens croissant, commande l'ouverture de l'interrupteur, son intersection avec la porteuse, en sens décroissant, commande la fermeture de l'interrupteur. [18]



III -3. Présentation de La carte Arduino :

Afin de contrôler le hacheur, nous choisissons la carte Arduino, pour générer et commandé le signal PWM.

III -3-1. Qu'est-ce que c'est la carte Arduino ?

Arduino est le nom d'un « fabricant » de circuits imprimés sur lesquels il est possible de brancher toutes sortes d'appareils. Cette carte se programme sur l'ordinateur via un câbles USB (ou autre) et permet ensuite de diriger n'importe quel appareil, il suffit pour cela de modifier le code qu'exécute l'Arduino. La particularité de ce système est qu'il est libre, c'est à dire que les plans des cartes sont disponibles gratuitement, il est possible de modifier et de réutiliser ces plans. C'est pourquoi de nombreux systèmes basés sur Arduino (freeduino, sparkfun, etc) existent. Seul le nom « Arduino » est déposé et n'est pas utilisable.

La carte Arduino est utilisée dans beaucoup d'applications comme la suivante :

- L'électrotechnique industrielle et embarquée ;
- Le modélisme ;
- La domotique mais aussi dans des domaines différents comme l'art contemporain et le pilotage d'un robot ;
- Commande des moteurs et faire des jeux de lumières ;
- Communiquer avec l'ordinateur ;
- Commander des appareils mobiles (modélisme). [20]

III -3-2. Pourquoi choisir la carte Arduino ?

- Un prix dérisoire étant donné l'étendue des applications possibles ;
- Une compatibilité sous toutes les plateformes, à savoir : Windows, Linux et Mac OS ;
- Une communauté ultra développée ;
- Des milliers de forums d'entre-aide, de présentations de projets, de propositions de programmes et de bibliothèques ... ;
- Un site en anglais arduino.cc et un autre en français arduino.cc où vous trouverez tout de la référence Arduino, le matériel, des exemples d'utilisations, de l'aide pour débiter, des explications sur le logiciel et le matériel ;
- Une liberté quasi absolue. Elle constitue en elle-même deux choses :
 - Le logiciel : gratuit et open source, développé en Java, dont la simplicité d'utilisation ;
 - Le matériel : cartes électroniques dont les schémas sont en libre circulation sur internet.

[21]



III -3-3. Les gammes de la carte Arduino :

Actuellement, il existe plus de 20 versions de module Arduino, nous citons quelques un afin d'éclaircir l'évaluation de ce produit scientifique et académique :

Tableau (III -1). Les gammes de la carte Arduino

Arduino	Microcontrôleur
- Le NG	ATmega8
- L'extrémité	ATmega8
- Mini	ATmega168.
- Nano	ATmega168, ATmega328
- Le LilyPad	ATmega168
- Le NG plus	ATmega168
- Bluetooth	ATmega168
- Diecimila	ATmega168
- Duemilanove	ATmega168, ATmega328
- Mega	ATmega1280
- UNO	ATmega328
- Leonardo	ATmega32U4
- Mega2560	ATmega2560, ATmega8U2, ATmega16U2

Parmi ces types, nous avons choisi la carte Arduino UNO (carte Basique). L'intérêt principal de cette carte est de faciliter la mise en œuvre d'une telle commande qui sera détaillée par la suite. L'Arduino fournit un environnement de développement s'appuyant sur des outils « open source » comme interface de programmation. L'injection du programme déjà converti par l'environnement sous forme d'un code « HEX » dans la mémoire du microcontrôleur se fait d'une façon très simple par la liaison USB. En outre, des bibliothèques de fonctions "clé en main" sont également fournies pour l'exploitation d'entrées-sorties. Cette carte est basée sur un microcontrôleur ATmega328 et des composants complémentaires. La carte Arduino contient une mémoire morte de 1 kilo. Elle est dotée de 14 entrées/sorties digitales (dont 6 peuvent être utilisées en tant que sortie PWM), 6 entrées analogiques et un cristal à 16 MHz, une connexion USB et Possède un bouton de remise à zéro (Reset) et une prise Jack d'alimentation. La carte est illustrée dans **la figure (III.3).**

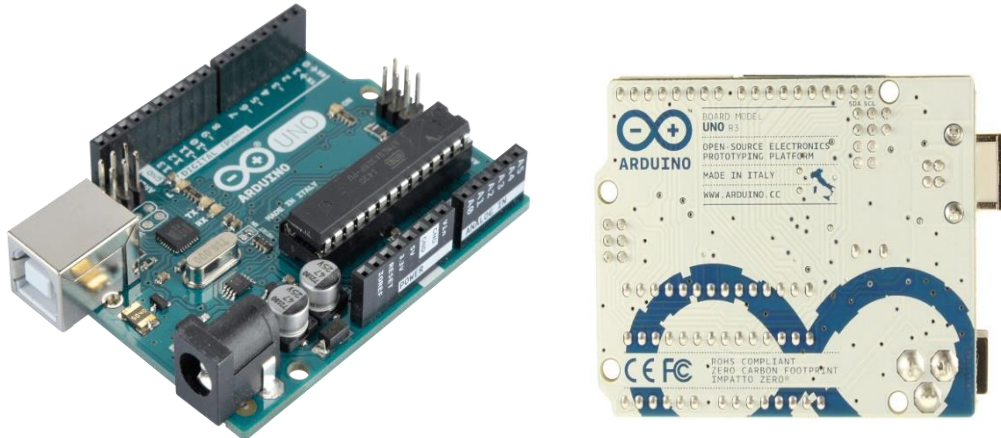


Fig. (III-3). La carte Arduino UNO.

Tableau (III -2). Spécifications techniques de la carte Arduino UNO. [27]

Spécifications	Valeur
- Microcontroller	ATmega328P
- Operating Voltage	5V
- Input Voltage (recommended)	7-12V
- Input Voltage (limit)	6-20V
- Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
- PWM Digital I/O Pins	6
- Analog Input Pins	6
- DC Current per I/O Pin	20 mA
- DC Current for 3.3V Pin	50 mA
- Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloade
- SRAM	2 KB (ATmega328P)
- EEPROM	1 KB (ATmega328P)
- Clock Speed	16 MHz
- LED_BUILTIN	13
- Length	68,6 mm
- Width	53,4 mm
- Weight	25 g

■ Pourquoi Arduino UNO ?

- Ce type est le plus populaire ;
- Disponible partout ;
- Simple, facile d'utilisation pour les débutants ;
- Suffisamment d'informations sur ce type disponible dans les sites Internet. [22]



III -3-4. La constitution de la carte Arduino UNO :

Un module Arduino est généralement construit autour d'un microcontrôleur « ATMELAVR », et de composants complémentaires qui facilitent la programmation et l'interfaçage d'autres circuits. Chaque module possède au moins un régulateur linéaire 5V et un oscillateur à quartz 16 MHz (ou un résonateur céramique dans certains modèles). Le microcontrôleur est préprogrammé avec un bootloader de façon à ce qu'un programmeur dédié ne soit pas nécessaire.

III -3-5. Parties de la carte Arduino UNO :

La carte Arduino est composée deux parties :

III -3-5-1. Partie matérielle :

Généralement tout module électronique qui possède une interface de programmation est basé toujours dans sa construction sur un circuit programmable ou plus.

III -3-5-1-1. Le microcontrôleur ATmega328 :

Un microcontrôleur ATmega328 est un circuit intégré qui rassemble sur une puce plusieurs éléments complexes dans un espace réduit au temps des pionniers de l'électronique. Aujourd'hui, en soudant un grand nombre de composants encombrants ; tels que les transistors ; les résistances et les condensateurs tout peut être logé dans un petit boîtier en plastique noir muni d'un certain nombre de broches dont la programmation peut être réalisée en langage C. **la figure (III.4)** montre un microcontrôleur ATmega 328, qu'on trouve sur la carte Arduino.

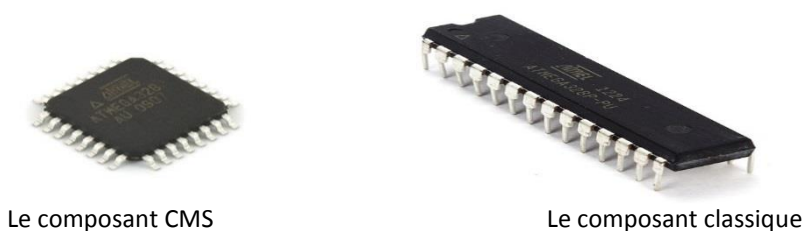


Fig. (III-4). Microcontrôleur Atmega328

Le microcontrôleur ATmega328 est constitué par un ensemble d'éléments qui ont chacun une fonction bien déterminée. Il est en fait constitué des mêmes éléments que sur la carte mère d'un ordinateur.

Globalement, l'architecture interne de ce circuit programmable se compose essentiellement sur :



- **La mémoire Flash** : C'est celle qui contiendra le programme à exécuter. Cette mémoire est effaçable et réinscriptible mémoire programme de 32 KB (dont bootloader de 0.5 KB).
- **RAM** : c'est la mémoire dite "vive", elle va contenir les variables du programme. Elle est dite "volatile" car elle s'efface si on coupe l'alimentation du microcontrôleur. Sa capacité est 2 KB.
- **EEPROM** : C'est le disque dur du microcontrôleur. On y enregistre des infos qui ont besoin de survivre dans le temps, même si la carte doit être arrêtée. Cette mémoire ne s'efface pas lorsque l'on éteint le microcontrôleur ou lorsqu'on le reprogramme. Sa capacité est 1 KB

III -3-5-1-2. Sources de l'alimentation de la carte :

On peut distinguer deux genres de sources d'alimentation (Entrée-Sortie) et cela comme suit :

- **VIN**. La tension d'entrée positive lorsque la carte Arduino est utilisée avec une source de tension externe (à distinguer du 5V de la connexion USB ou autre source 5V régulée). On peut alimenter la carte à l'aide de cette broche, ou, si l'alimentation est fournie par le Jack d'alimentation, accéder à la tension d'alimentation sur cette broche.
- **5V** : La tension régulée utilisée pour faire fonctionner le microcontrôleur et de la carte (pour info : les circuits électroniques numériques nécessitent une tension d'alimentation parfaitement stable dite "tension régulée" obtenue à l'aide d'un composant appelé un régulateur et qui est intégré à la carte Arduino). Le 5V régulé fourni par cette broche peut donc provenir soit de la tension d'alimentation VIN via le régulateur de la carte, ou bien de la connexion USB (qui fournit du 5V régulé) ou de tout autre source d'alimentation régulée .les autres composants.
- **3.3V** : Une alimentation de 3.3V fournie par le circuit intégré FTDI (circuit intégré faisant l'adaptation du signal entre le port USB de votre ordinateur et le port série de l'ATmega) de la carte est disponible : ceci est intéressant pour certains circuits externes nécessitant cette tension au lieu du 5V. L'intensité maximale disponible sur cette broche est de 50mA. [23]

III -3-5-1-3. Les entrées et sorties :

Cette carte possède 14 broches numériques (numérotée de 0 à 13) peut être utilisée soit comme une entrée numérique, soit comme une sortie numérique, en utilisant les instructions pin Mode (), digital Write () et digital Read () du langage Arduino. Ces broches fonctionnent en 5V. Chaque broche peut fournir ou recevoir un maximum de 40mA d'intensité et dispose d'une résistance interne de "rappel au plus" (pull-up) (déconnectée par défaut) de 20-50 KOhms. Cette résistance interne s'active sur une broche en entrée à l'aide de l'instruction digital Write (broche, HIGH). En plus, certaines broches ont des fonctions spécialisées :



- **Interruptions externes** : Broches 2 et 3. Ces broches peuvent être configurées pour déclencher une interruption sur une valeur basse, sur un front montant ou descendant, ou sur un changement de valeur. -Impulsion PWM (largeur d'impulsion modulée) : Broches 3, 5, 6, 9, 10, et 11. Fournissent une impulsion PWM 8-bits à l'aide de l'instruction analogique Write ().
- **SPI** (Interface Série Périphérique) : Broches 10, 11, 12, 13. Ces broches supportent la communication SPI disponible avec la librairie pour communication SPI.
- **I2C** : Broches 4 et 5. Supportent les communications de protocole I2C (ou interface TWI) ;(Two Wire Interface - Interface "2 fils"), disponible en utilisant la librairie Wire/I2C (ou TWI - Two-Wire interface - interface "2 fils").
- **LED** : Broche 13. Il y a une LED incluse dans la carte connectée à la broche 13. Lorsque la broche est au niveau HAUT, la LED est allumée, lorsque la broche est au niveau BAS, la LED est éteinte.

La carte UNO dispose 6 entrées analogiques (numérotées de 0 à 5), chacune pouvant fournir une mesure d'une résolution de 10 bits (c à d sur 1024 niveaux soit de 0 à 1023) à l'aide de la très utile fonction analog Read () du langage Arduino. Par défaut, ces broches mesurent entre le 0V (valeur 0) et le 5V (valeur 1023), mais il est possible de modifier la référence supérieure de la plage de mesure en utilisant la broche AREF et l'instruction analog Reference () du langage Arduino. La carte Arduino UNO intègre un fusible qui protège le port USB de l'ordinateur contre les surcharges en intensité (le port USB est généralement limité à 500mA en intensité). Bien que la plupart des ordinateurs aient leur propre protection interne, le fusible de la carte fournit une couche supplémentaire de protection. Si plus de 500mA sont appliqués au port USB, le fusible de la carte coupera automatiquement la connexion jusqu'à ce que le court-circuit ou la surcharge soit stoppé.

III -3-5-1-4. Les ports de communications : [22]

La carte Arduino UNO a de nombreuses possibilités de communications avec l'extérieur. L'Atmega328 possède une communication série UART TTL (5V), grâce aux broches numériques 0 (RX) et 1 (TX).

On utilise (RX) pour recevoir et (TX) transmettre (les données séries de niveau TTL). Ces broches sont connectées aux broches correspondantes du circuit intégré ATmega328 programmé en convertisseur USB – vers – série de la carte, composant qui assure l'interface entre les niveaux TTL et le port USB de l'ordinateur. Comme un port de communication virtuel pour le logiciel sur l'ordinateur, La connexion série de l'Arduino est très pratique pour



Une telle carte d'acquisition qui se base sur sa construction sur un microcontrôleur doit être dotée d'une interface de programmation comme est le cas de notre carte. L'environnement de programmation open-source pour Arduino peut être téléchargé gratuitement (pour Mac OS X, Windows, et Linux).

Le logiciel de programmation de la carte Arduino sert d'éditeur de code (langage proche du C). Une fois, le programme tapé ou modifié au clavier, il sera transféré et mémorisé dans la carte à travers de la liaison USB. Le câble USB alimente à la fois en énergie la carte et transporte aussi l'information ce programme appelé IDE Arduino.

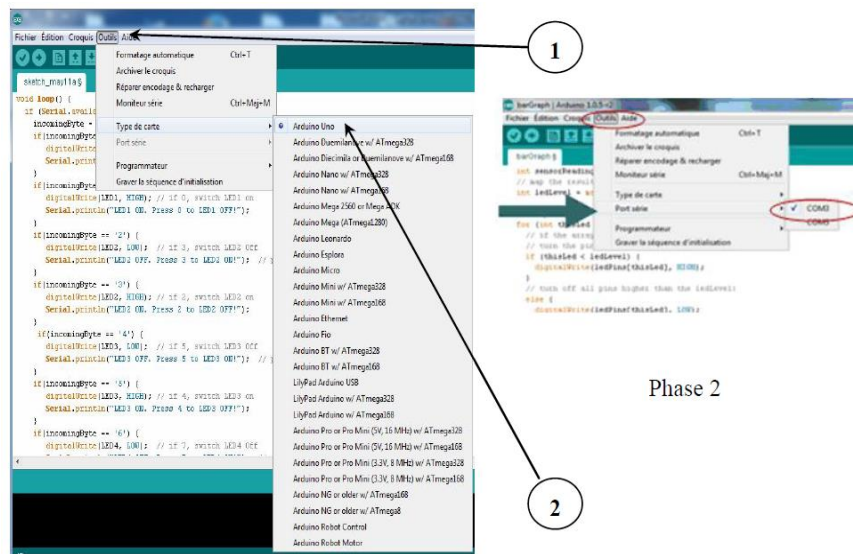
Comme n'importe quel langage de programmation, une interface souple et simple est exécutable sur n'importe quel système d'exploitation Arduino basé sur la programmation en C.





III -3-5-2-1-B. Injection du programme :

Avant d'envoyer un programme dans la carte, il est nécessaire de sélectionner le type de la carte (Arduino Uno) et le numéro de port USB (COM) comme à titre d'exemple cette figure.



Phase 1

Phase 2

Fig. (III-7). Paramétrage de la carte.

III -3-5-2-1-C. Les étapes de téléchargement du programme :

Une simple manipulation enchaînée doit être suivie afin d'injecter un code vers la carte Arduino via le port USB.

1. On conçoit ou on ouvre un programme existant avec le logiciel IDE Arduino. ;
2. On vérifie ce programme avec le logiciel Arduino ;
3. Si des erreurs sont signalées, on modifie le programme ;
4. On charge le programme sur la carte ;
5. On câble le montage électronique ;
6. L'exécution du programme est automatique après quelques secondes ;
7. On alimente la carte soit par le port USB, soit par une source d'alimentation autonome
8. On vérifie que notre montage fonctionne. [23]



Fig. (III-8). Les étapes de téléchargement du code.

III -3-5-2-2. MATLAB Arduino :

Avec Support Package MATLAB pour Arduino matériel, vous pouvez utiliser MATLAB pour communiquer de manière interactive avec une carte Arduino via un câble USB. Le package vous permet d'effectuer des tâches telles que :

- Acquérir des données de capteurs analogiques et numériques à partir de la carte Arduino ;
- Contrôler d'autres appareils avec sorties numériques et MLI ;
- Conduisez DC, moteurs pas à pas et des capteurs périphériques d'accès connectés via I2C ou SPI ;
- Construire des add-ons à l'interface avec les bibliothèques matérielles et logicielles supplémentaires.

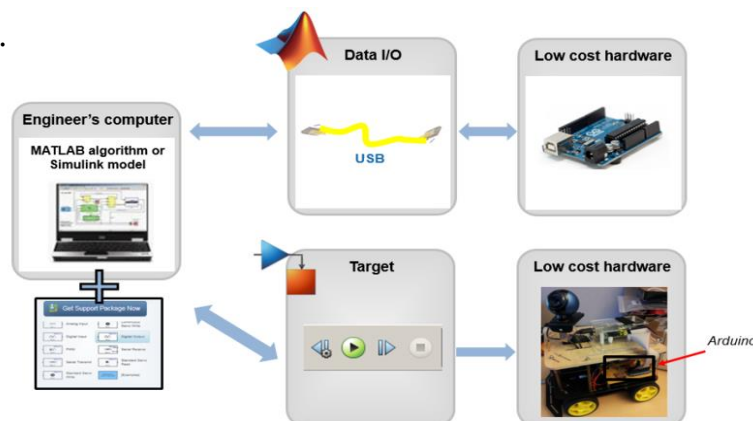


Fig. (III-9). Utiliser MATLAB pour communiquer avec la carte Arduino.

Parce que MATLAB est un langage de haut niveau interprété, nous pouvons voir les résultats des instructions d'Entrée / Sortie immédiatement, sans compiler. MATLAB comprend des milliers de mathématiques intégré, l'ingénierie et des fonctions graphiques que vous pouvez utiliser pour analyser et visualiser rapidement les données recueillies à partir de votre Arduino.



Dans ce mémoire, nous avons utilisé MATLAB R2013b. [24]

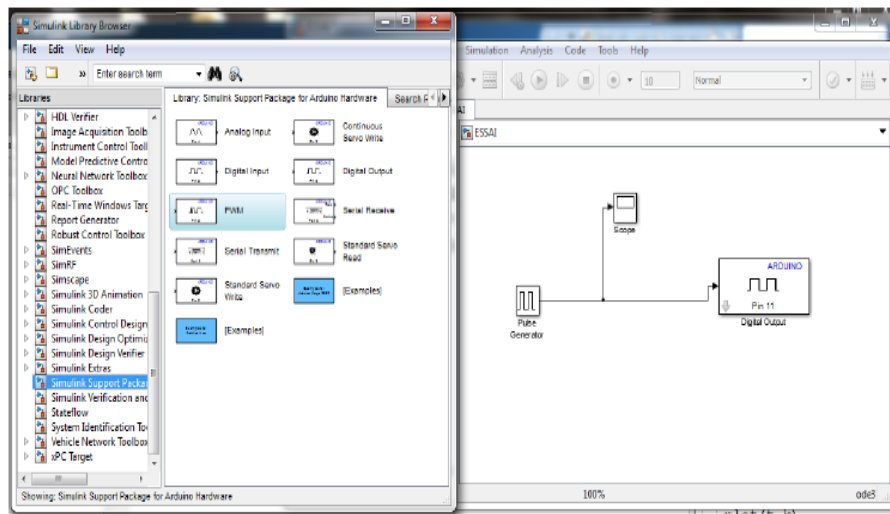


Fig. (III-10). Communication de carte Arduino avec MATLAB.

III -3-6. Architecture interne :

La figure (III.11) présente l'architecture interne de la carte Arduino Uno, une telle carte d'acquisition qui se base sur sa construction sur un microcontrôleur doit être dotée d'une interface de programmation comme est le cas de notre carte. L'environnement de programmation open-source pour Arduino peut être téléchargé gratuitement (pour Mac OS X, Windows, et Linux). [23]

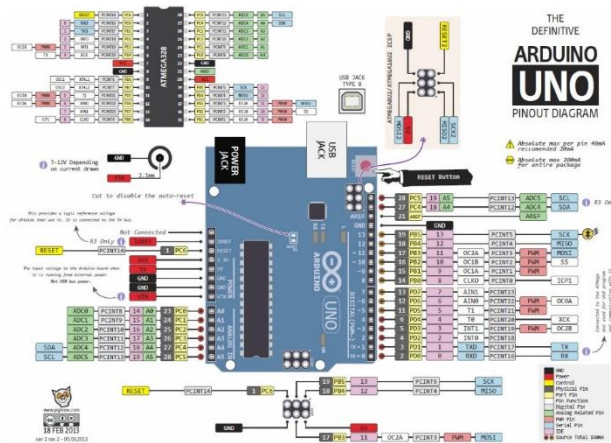


Fig. (III-11). Architecture interne de la carte Arduino Uno

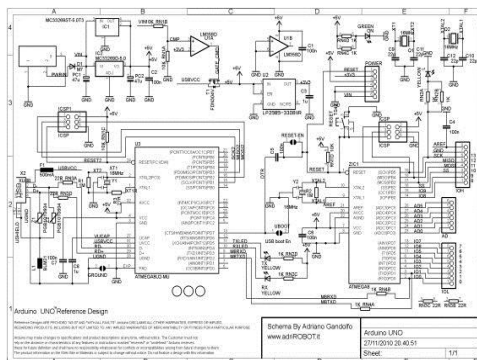


Fig. (III-12). Schéma électronique de la carte Uno

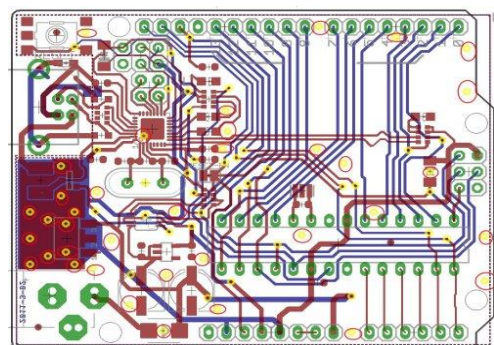


Fig. (III-13). Typon de la carte Uno. [28]



III -4. Commande du Hacheur (Boost) par La carte Arduino UNO :

Dans ce partie on va présenter la méthode de La réalisation du hacheur survolteur qui composé de trois circuit fondamentaux, qui représenté sur **La figure (III.14)**, le signal de commande entrée dans l'optocoupleur, qui assuré l'isolation entre la carte ARDUINO et le circuit de commande, le signal commander le circuit de la tension élevées (la partie puissance du hacheur). Le signal de commande est envoyé par l'optocoupleur vers les MOSFETs. [25]

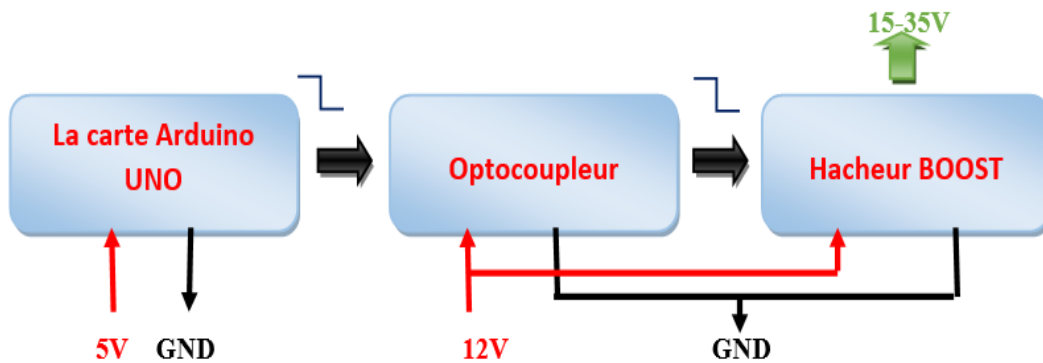


Fig. (III-14). Schéma fonctionnel du Hacheur (Boost)

III -4-1. Optocoupleur :

Nous avons besoin d'isoler la partie commande de la partie puissance. Pour cela, nous utilisons l'optocoupleur. Nous avons donc deux masses bien distinctes dans notre carte. La première : la masse B.GND qui est la masse de puissance. Ainsi que la masse A.GND qui est la masse de commande et de l'alimentation 5V. Notre choix s'est porte sur optocoupleurs **4N26**. [22]

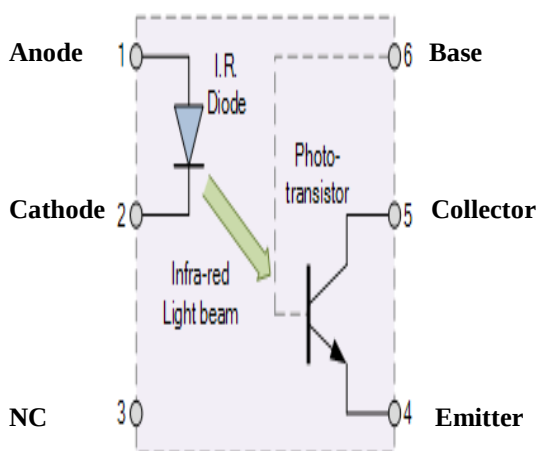


Fig. (III-15). Schéma de l'optocoupleur.

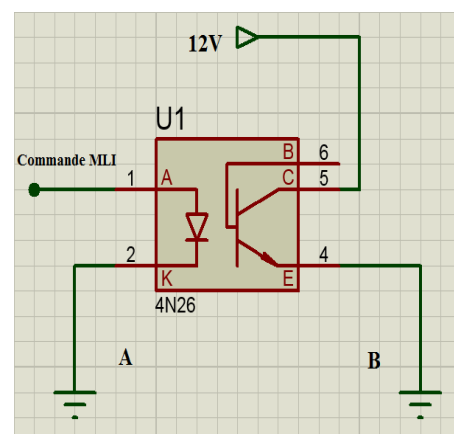


Fig. (III-16). Schéma fonctionnel de l'optocoupleur.



III -4-2. Les Composants de la carte électronique :

On présente les composants utilisés dans cette carte électronique sur le tableau ci-dessous et le détaille dans l'annexe (Data Sheet catalogue).

Tableau (III -3). Les composants utilisés dans la carte électronique.

Composant	Référence	Nombre de composant	Caractéristique
Optocoupleur	4N26	1	Entré (5V-100mW) Sortie (70V- 150mW)
Transistors(MOSFET)	IRF840N	1	500V-8A
L'inductance	580mH	1	-
Résistances	5.6K Ω	2	-
	100 Ω	2	-
Condensateur	2200uF	1	35V
Diode	1N4007	1	1000V-30A

Sur la carte on peut aussi remarquer la présence d'un radiateur de refroidissement assez imposant, son rôle est de dissiper l'énergie calorifique émise par le transistor (Mosfet) et la diode de puissance.

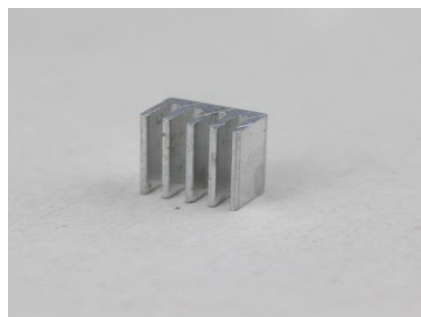


Fig. (III-17). Radiateur de composant.

III -4-3. La réalisation virtuelle « PORTEUS » :

Avant de passer à la réalisation pratique, nous avons utilisé un CAO : il s'agit d'ISIS-PORTEUS, c'est un CAO électronique perfectionné conçu par Labcenter Electronics qui permet de dessiner des schémas électroniques, de les simuler et de réaliser le circuit imprimé correspondant. Le CAO électronique « PROTEUS » se compose de nombreux outils regroupés en modules au sein d'une interface unique.

Ce dernier nous permet de schématiser notre carte électrique et la simuler virtuellement comme le montre la figure suivante : [23]

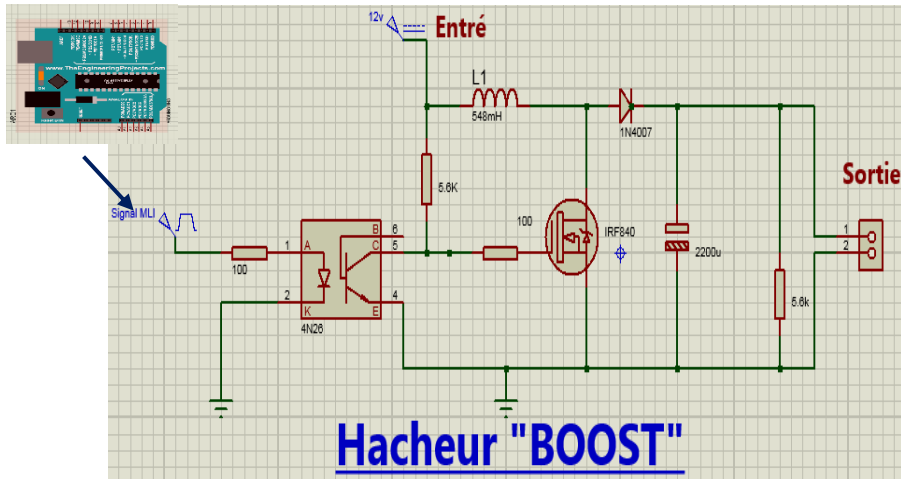


Fig. (III-18). Schéma du Hacheur (Boost) dans PROTEUS-ISIS.

Dans ce schéma, nous notons que le signal de commande est inversé entre la carte Arduino et transistor, dans le circuit d'optocoupleur. Les figures et le tableau suivant expliquent ce processus.

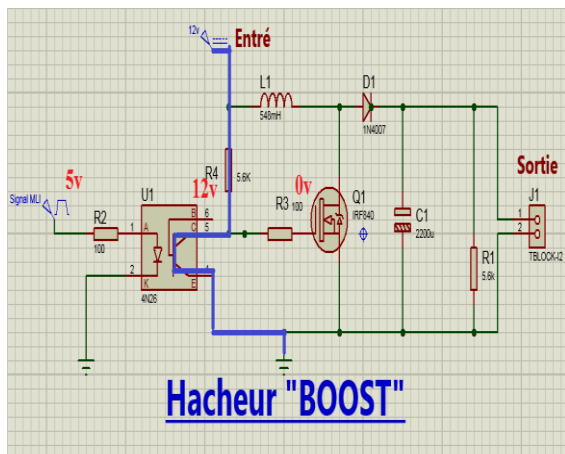


Fig. (III-19). La relation entre l'Arduino et MOSFET dans la première cas.

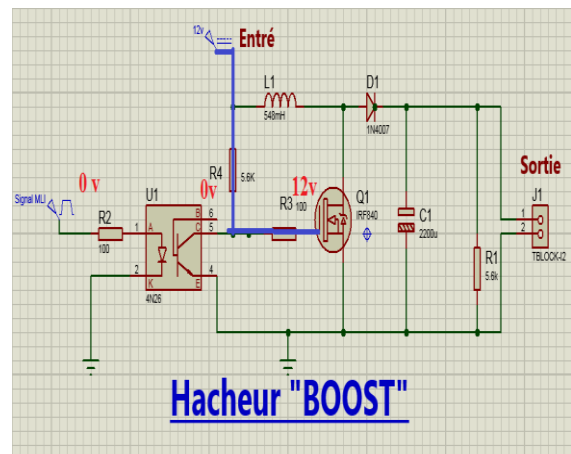


Fig. (III-20). La relation entre l'Arduino et MOSFET dans la deuxième cas

Tableau (III -4). La relation entre l'Arduino et MOSFET.

	Arduino	Optocoupleur	Mosfet
Logique	1	1	0
	0	0	1
Numérique	5V	12V	0V
	0V	0V	12V
Impulsion	80%	80%	20%
	34%	34%	66%



III -4-3-1.Résultats de simulation :

► pour $\alpha_{MAX}=66\%$:

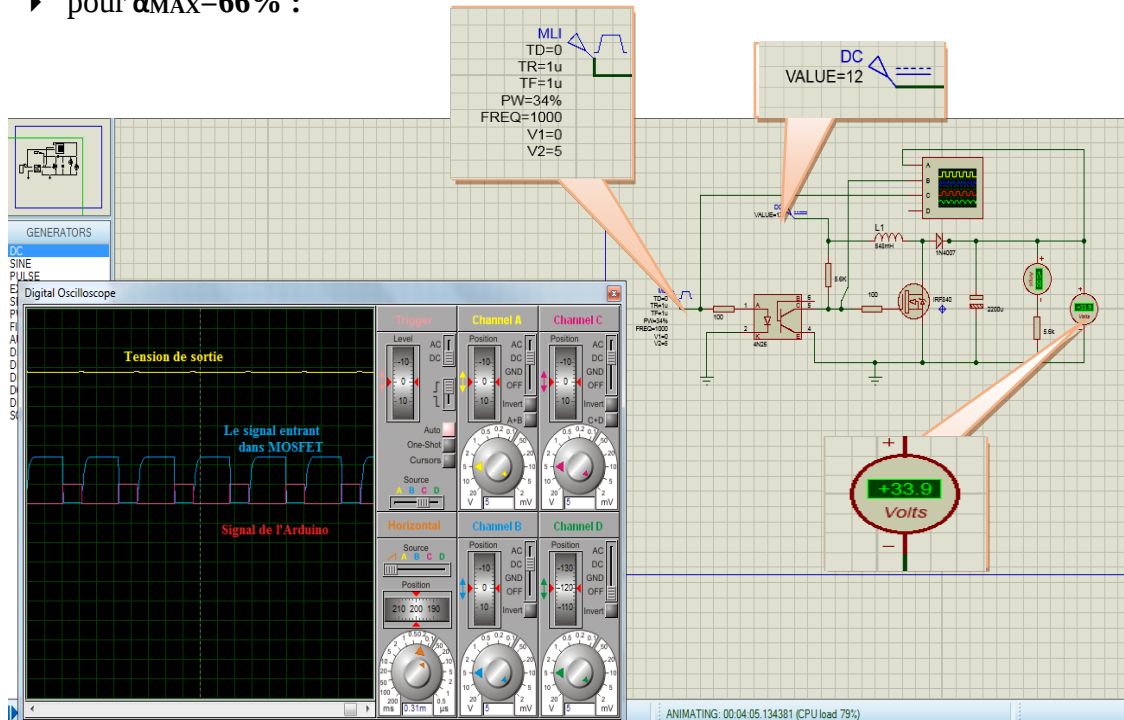


Fig. (III-21). Résultats de simulation en PROTEUS Isis pour $\alpha_{MAX}=66\%$.

► pour $\alpha_{MIN}=20\%$:

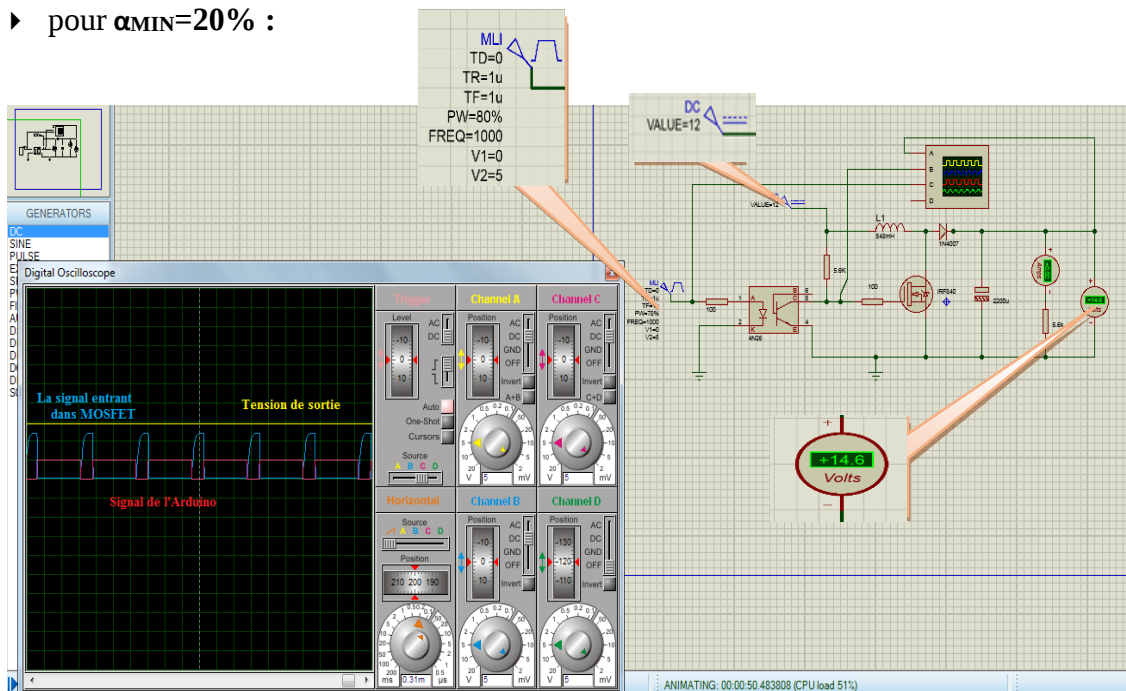


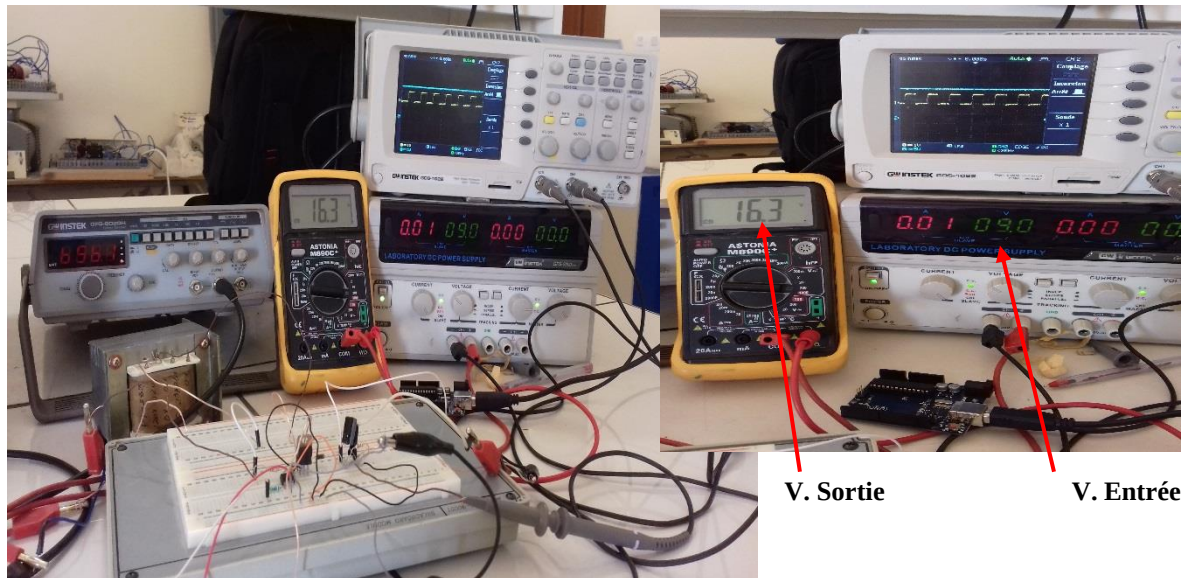
Fig. (III-22). Résultats de simulation en PROTEUS Isis pour $\alpha_{MAX}=20\%$.



III -4-4. La réalisation de circuit électronique :

III -4-4-1. Tester le montage du hacheur (Boost) dans la plaque d'essai :

Pour tester un montage avant la soudure, il est préférable de vérifier si celui-ci fonctionne correctement. La plaque d'essai (ou Breadboard) est un très bon moyen pour tester un montage sans effectuer aucune soudure et s'assurer rapidement qu'il n'y a pas d'erreur dans notre montage.



V. Sortie

V. Entrée

Fig. (III-23). Tester le montage du hacheur dans la plaque d'essai.

III -4-4-2. Réalisation du prototype :

Comme dans la figure suivante, nous avons réalisés le circuit du hacheur « Boost » localement.

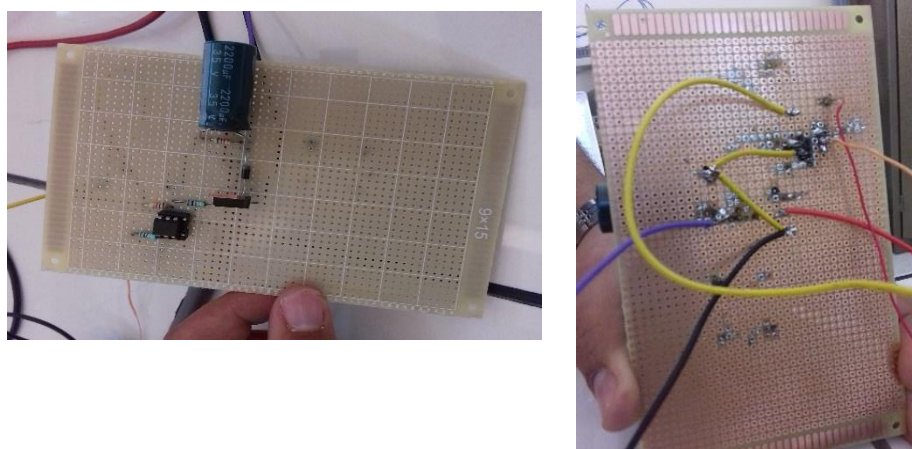


Fig. (III-24). Le circuit du hacheur « Boost » réalisé localement.



III -4-4-3. Liaison l'Arduino avec logiciel MATLAB\Simulink et hacheur « Boost » :



Fig. (III-25). Schéma de liaison l'Arduino avec logiciel MATLAB\Simulink et hacheur « Boost ».

Les connections externes de la carte Arduino avec logiciel MATLAB\Simulink et hacheur « Boost » sont représentées sur La figure (III.26) :

Signal de commande Tension d'entrée

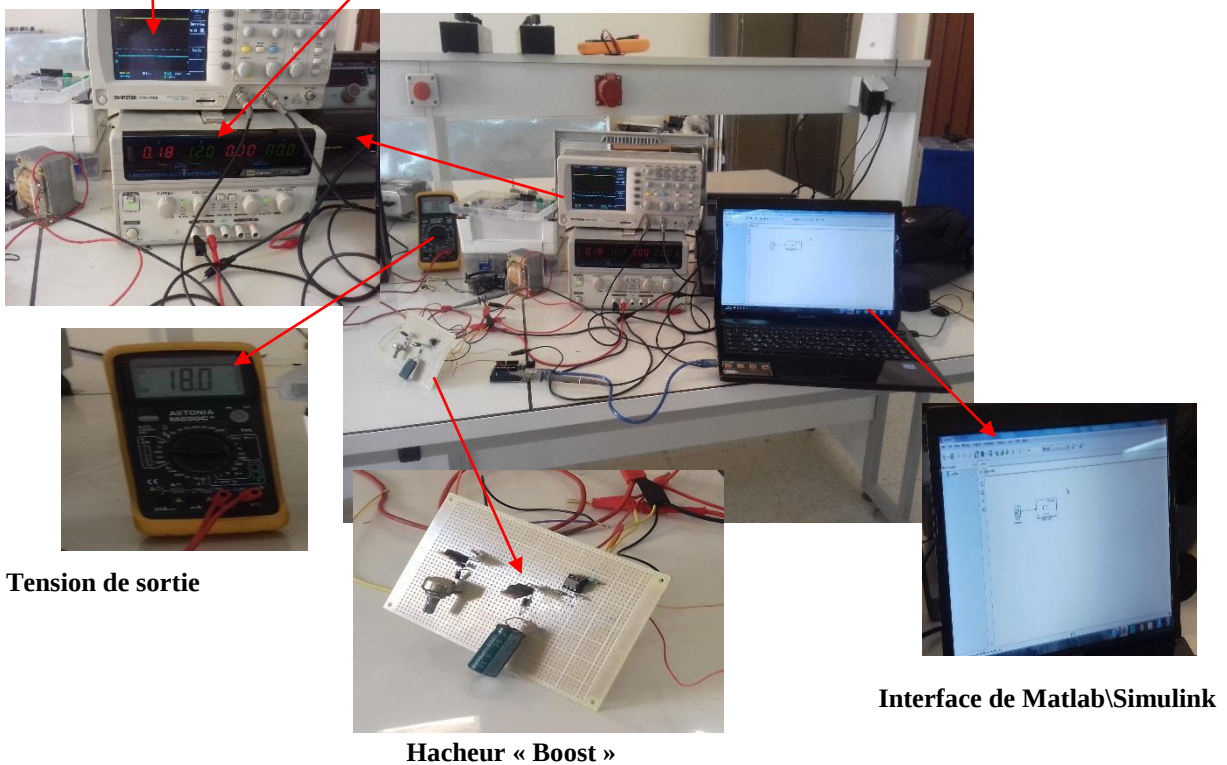


Fig. (III-26). Liaison l'Arduino avec logiciel MATLAB\Simulink et hacheur « Boost ».

III -5. Régulateur de Tension LM317 :

Classiques ou astucieux, les montages à bases du régulateur de tension LM317 sont nombreux et aideront à la conception d'alimentations stabilisées.



III -5-1. Description du régulateur LM317 :

Le LM317 est un régulateur de tension positive à trois bornes ajustable capable de fournir plus de 1,5 A sur une plage de tensions de sortie de 1,25 V à 37 V. Il ne requiert que deux résistances externes pour définir la tension de sortie. Le dispositif présente une régulation de ligne typique de 0,01 % et une régulation de charge typique de 0,1 %. Il inclut la limitation de courant, la protection contre la surcharge thermique et la protection de l'aire de sécurité. La protection contre la surcharge reste fonctionnelle même si la borne d'ajustement est déconnectée. [26]

III -5-2. Connexions du LM317 :

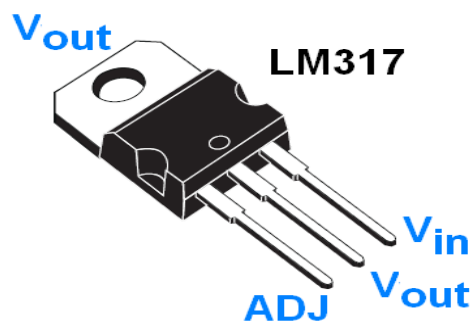


Fig. (III-27). Broches du LM317.

V_{out} : Sortie (reliée au boîtier)

V_{in} : Entrée

ADJ : Patte d'ajustement

III -5-3. Fonctionnement du LM317 :

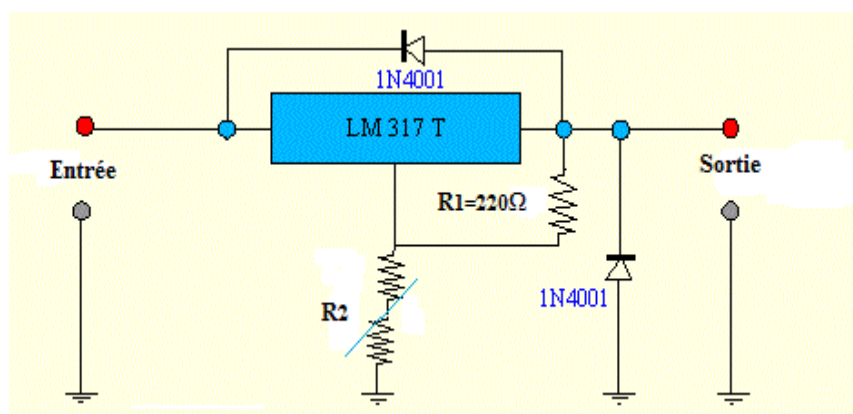


Fig. (III-28). Schéma du LM317



La tension de sortie V_s répond à la formule suivante :

- $V_s = 1,25 (1 + R_2/R_1)$

(III -1)

Pour

R_1 : la valeur recommandée est de 220 Ohms,

R_2 : dans notre cas, nous avons utilisé un potentiomètre.

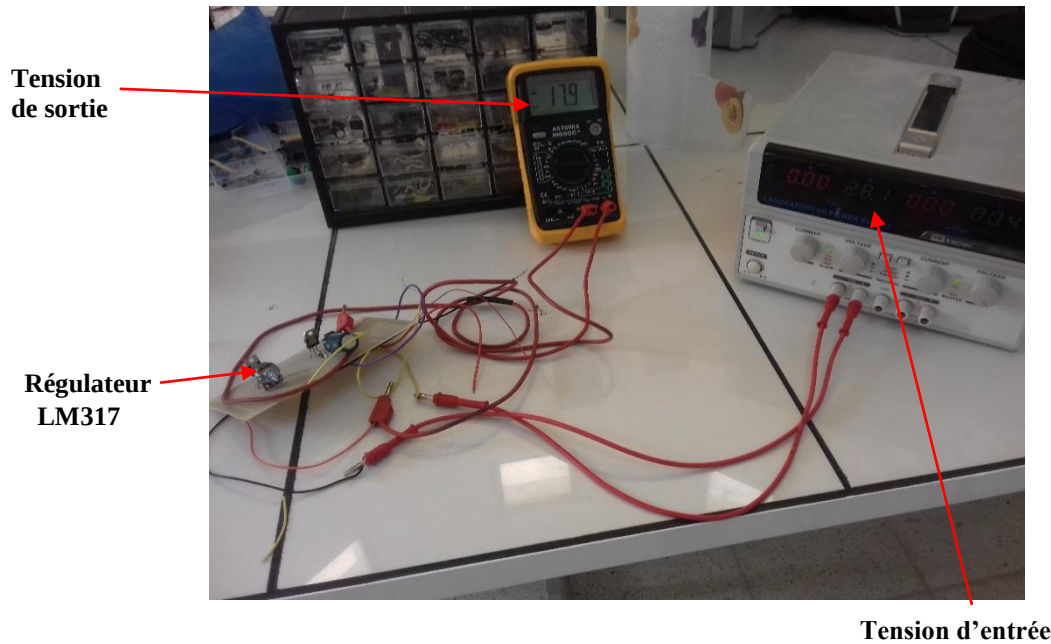


Fig. (III-29). Montage du LM317.

III -6. Utiliser La carte Arduino avec LCD 16x2 Comme d'un Voltmètre :

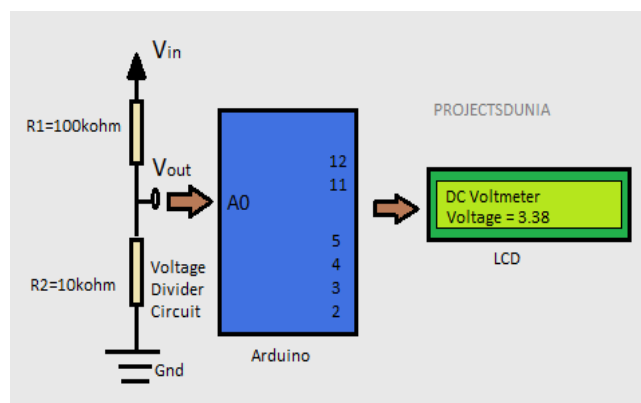


Fig. (III-30). Schéma de voltmètre à l'aide de la carte Arduino.

Comme vous le savez peut-être, les entrées analogiques d'Arduino peuvent être utilisées pour mesurer la tension continue entre 0 et 5V (lors de l'utilisation de la tension de référence analogique 5V standard) et cette gamme peut être augmentée en utilisant deux résistances pour



créer un diviseur de tension. Le diviseur de tension diminue la tension mesurée dans la gamme des entrées analogiques d'Arduino.

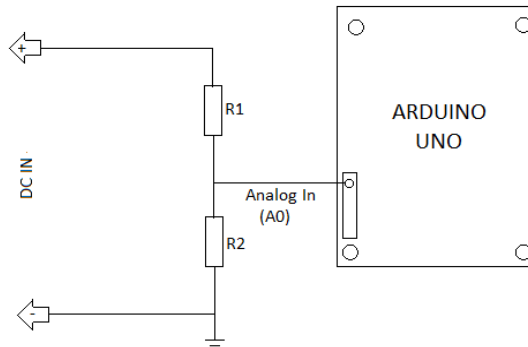


Fig. (III-31). Mesurer la tension par La carte Arduino.

Le capteur analogique sur la carte Arduino détecte la tension sur la broche analogique et la convertit en un format numérique pouvant être traité par le microcontrôleur. Ici, nous alimentons la tension d'entrée à la broche analogique (A₀) en utilisant un circuit diviseur de tension simple comprenant des résistances R1 (100K) et R2 (10K). Avec les valeurs utilisées dans le diviseur de tension, il est possible d'alimenter la tension de 0V à 55V dans la carte Arduino. La jonction sur le réseau diviseur de tension connecté à la broche analogique d'Arduino est équivalente à la tension d'entrée divisée par 11, donc $55\text{ V} \div 11 = 5\text{ V}$. En d'autres termes, lors de la mesure de 55 V, la broche analogique d'Arduino sera à sa tension maximale de 5V. Donc, dans la pratique, il est préférable d'étiqueter ce voltmètre comme "0-30V " pour ajouter une marge de sécurité.

L'équation du diviseur de tension est :

- $V_{\text{out}} = (R2 / (R1 + R2)) \times V_{\text{in}}$

(III -2)

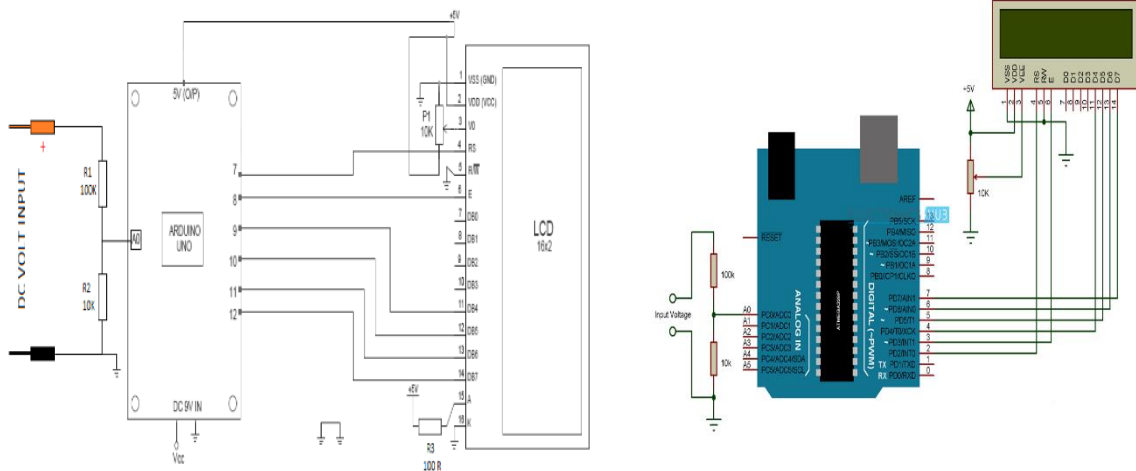


Fig. (III-32). Schéma de voltmètre numérique à l'aide de la carte Arduino et LCD.

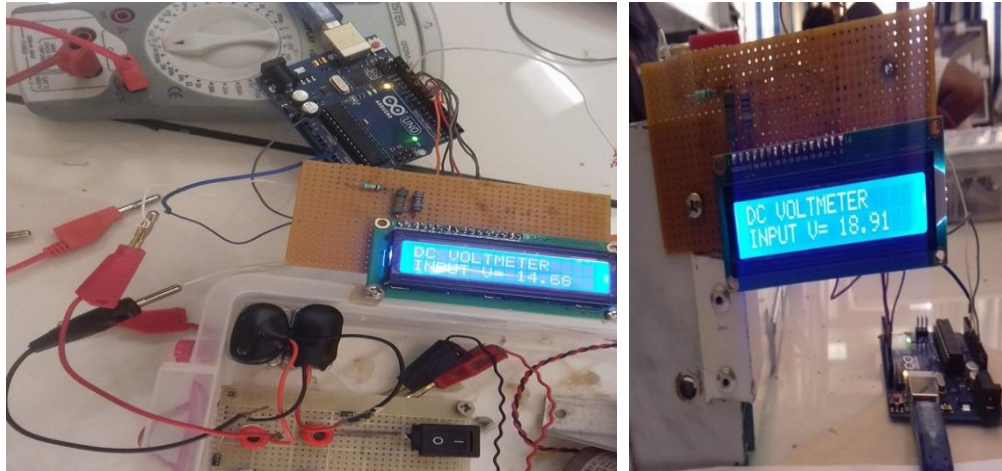


Fig. (III-33). Voltmètre numérique par la carte Arduino

III -7. Commande d'un Hacheur "Boost" Alimenté par un Panneau Solaire à L'aide d'une Carte Arduino :

III -7-1. Présentation du banc d'essai :

Notre banc d'essai est composé d'un panneau solaire, d'un régulateur de panneau solaire, d'un hacheur Boost, d'une carte Arduino, d'un MCC 15V et MCC 12V, régulateur de charge LM317, batterie 18V et LCD 16*2 :

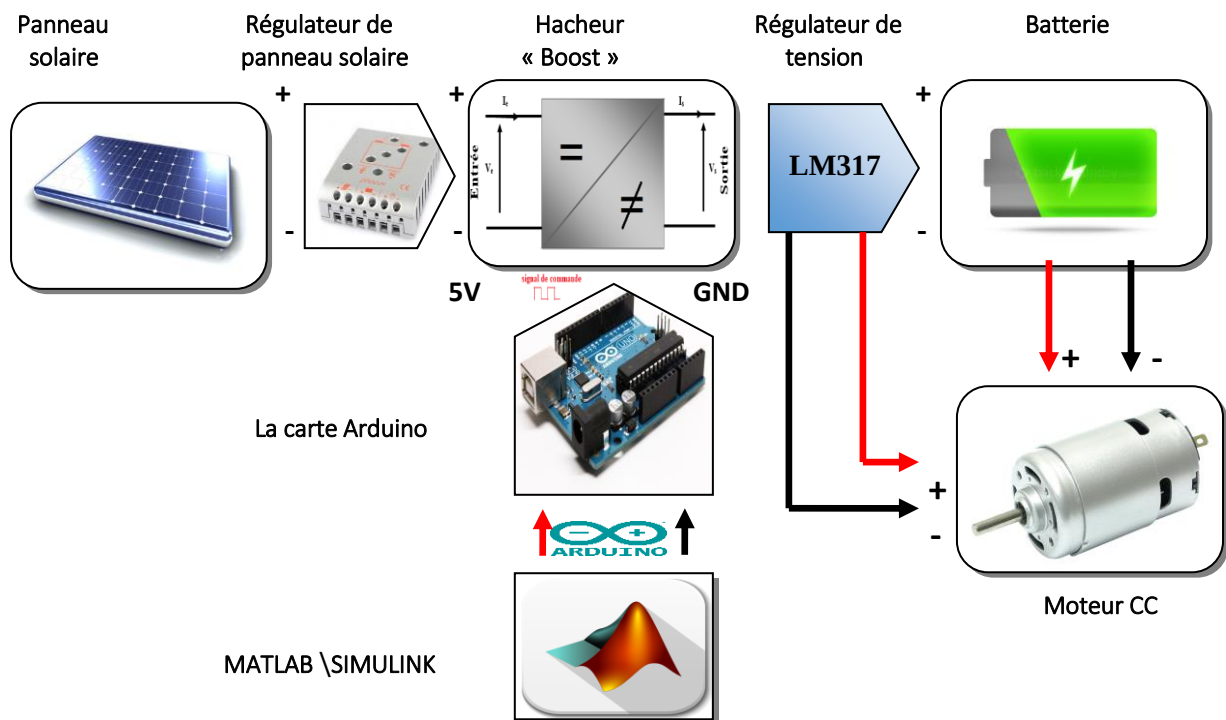


Fig. (III-34). Schéma bloc global.



III -7-2. Description générale de système :

L'application comporte principalement trois parties, une partie commande, un étage de puissance et un étage de charge et de batterie :

- Etage de commande : C'est la partie responsable de la génération de signal de commande ; nous avons utilisé la carte Arduino avec logiciel Matlab. Ceci permet de commander directement le rapport cyclique variable " α " qui génère le signal de modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour la commande de notre convertisseur.

- Etage de puissance : Cette partie contient le convertisseur DC/DC (hacheur Boost). En électronique de puissance, on utilise de plus en plus des convertisseurs utilisant des interrupteurs électroniques fonctionnant soit à l'état passant (ou fermé), soit à l'état bloqué (ou ouvert). Le passage d'un état à l'autre s'effectue périodiquement.

- Etage du régulateur de charge : La puissance produite par le générateur PV alimente la batterie et (ou) la charge.

La visualisation permet à l'utilisateur de voir l'état de fonctionnement instantané de la batterie. Pour cela on utilise le montage suivant :

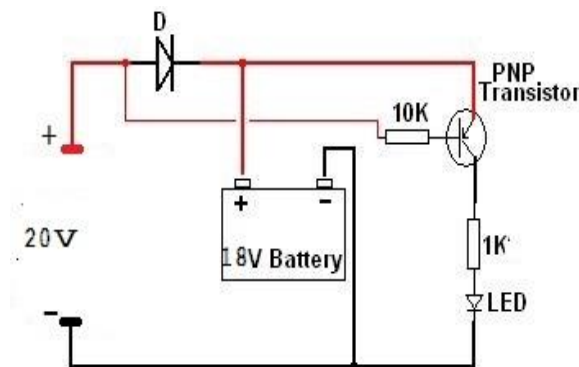


Fig. (III-35). Circuit de charge.

Pour afficher la tension entre borne de batterie, Nous avons utilisé voltmètre numérique à l'aide de la carte Arduino et LCD16*2.



III -7-3. Le résultat d'essai expérimental :



Fig. (III-36). Réalisation d'essais.

- Le premier cas : pour $\alpha=20\%$, Moteur CC -15V :

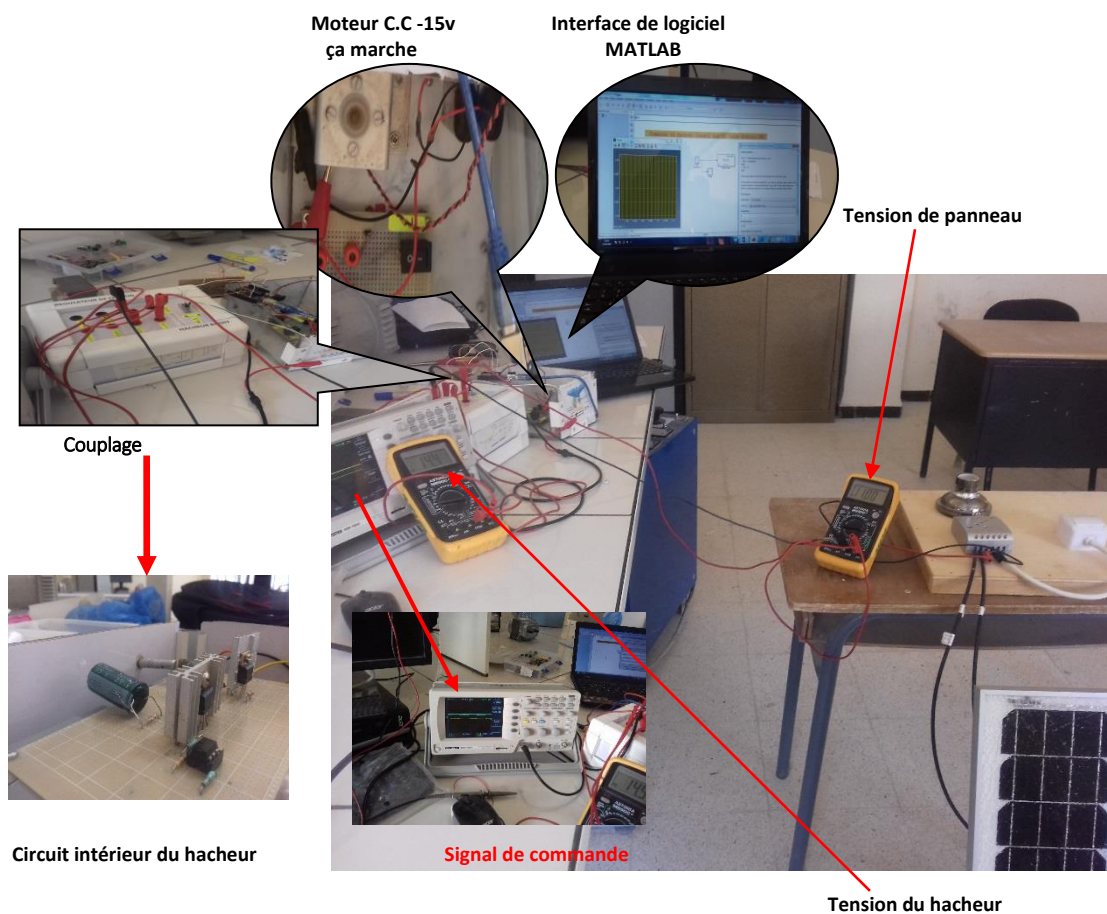


Fig. (III-37). La réalisation du premier essai, pour $\alpha=20\%$.



- Le second cas : pour $\alpha=50\%$, Moteur CC -12V :

Couplage hacheur -régulateur

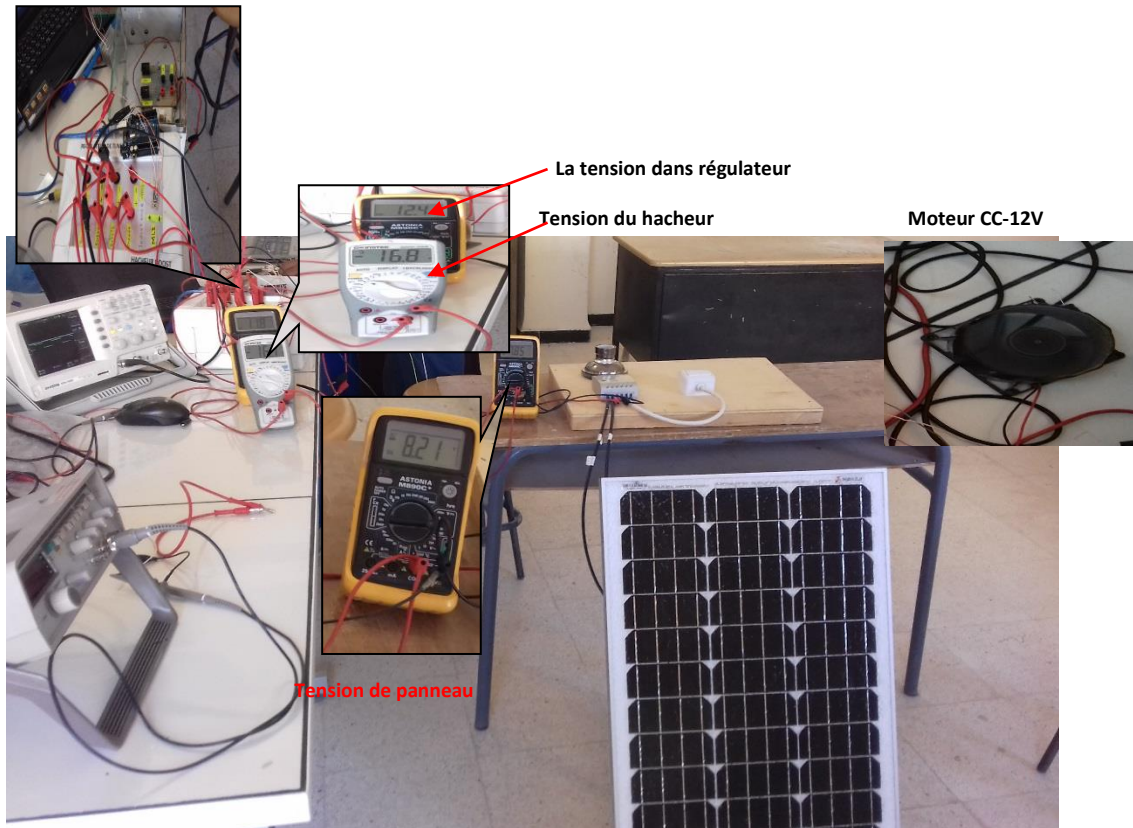


Fig. (III-38). La réalisation du second essai, pour $\alpha=50\%$.

- le troisième cas : pour $\alpha=40\%$, Charge de la batterie 18V :

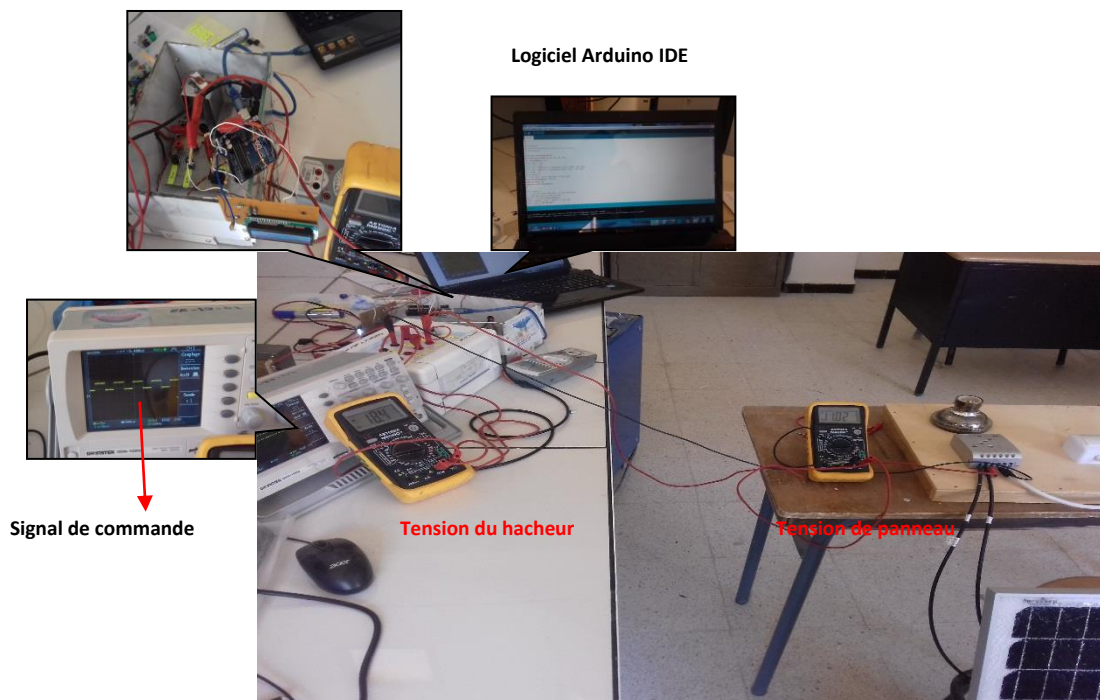


Fig. (III-39). La réalisation du troisième essai, pour $\alpha=40\%$.

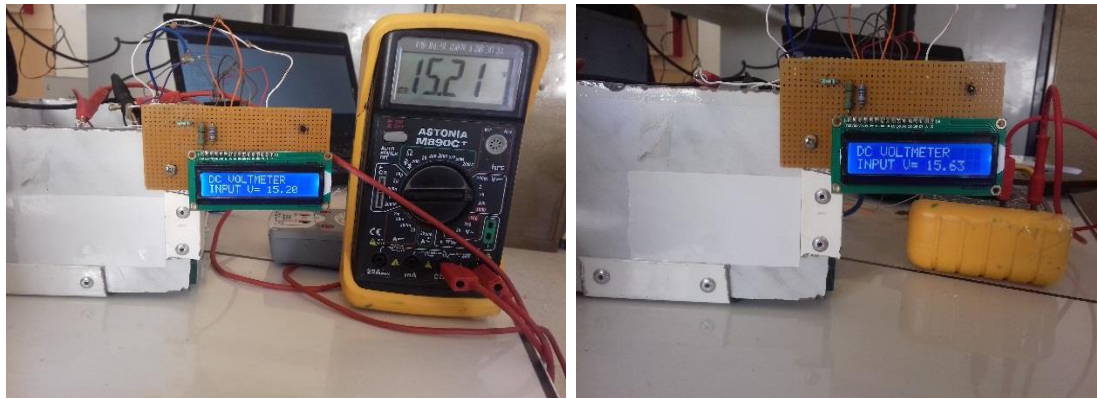


Fig. (III-40). Mesure de tension de la batterie.

III -8. Conclusion :

Ce chapitre a donné lieu à la réalisation pratique d'un hacheur "Boost" alimenté par un panneau solaire à l'aide d'une carte Arduino. Le hacheur "Boost" est commandé avec logiciel MATLAB-2013 et la carte Arduino via à la technique MLI. L'ensemble des travaux décrits dans ce chapitre est :

- ▶ La conception des composants électroniques qui compose la carte réalisée à l'aide de logiciel (ISIS- PROTUSE) ;
- ▶ Utiliser la carte Arduino et LCD comme d'un voltmètre numérique pour afficher la tension entre la borne de charge ;
- ▶ L'identification des paramètres des circuits d'alimentation, circuit de commande et circuit de puissance.

Dans la fin de ce chapitre, nous avons présenté Les résultats d'essai expérimental et cette résultats est très satisfaisantes et conforme à notre cahier de charge.

Conclusion Générale

Promotion 2017



Conclusion Générale

Ce travail a été pour nous, le premier pas vers un monde nouveau et complexe, mais très intéressant notre recherche bibliographique dans les domaines de l'électronique, de l'électrotechnique et de l'informatique tel que les interrupteurs électroniques, les hacheurs, les systèmes photovoltaïques et la programmation du logiciel, nous a permis d'enrichir nos connaissances et de développer notre base théorique et pratique.

Ce mémoire est consacré à la réalisation du convertisseur (DC-DC) élévateur de type « Boost » commandé par la carte Arduino avec MATLAB/Simulink.

Nous avons étudié le convertisseur (DC-DC) et son structure générale avec des lois de fonctionnement puis on a adapté un programme sous l'environnement MATLAB qui simplifie le fonctionnement du convertisseur.

Les résultats, de simulation et de pratique, obtenus montrent la variation de la tension entre la charge et la source. Ceci nous a donné une déduction avec les relations qui a permis de donner la justification de l'augmentation de la tension vers la charge.

Ainsi que, l'étude en régime permanent, et la recherche bibliographie sur les convertisseurs (DC-DC), menées aussi bien sur le plan théorique avec les hypothèses de simplifications, ont permis de montrer que :

- Dans le cas de l'utilisation d'un convertisseur (DC-DC) « Boost » asynchrone il peut être intéressant de contrôler le niveau de tension en sortie (à partir de contrôler le rapport cyclique de l'ouverture et fermeture de l'interrupteur IGBT, MOSFET, transistor bipolaire...).
- L'avantage principal offert par les convertisseurs (DC-DC), Il fournit une tension de sortie variable rapidement (si la fréquence de découpage le permet). Il sera donc très intéressant dans toutes les applications industrielles.
- Les grandeurs électriques des composants du convertisseur (DC-DC) « Boost » sont des grandeurs mesurables, ce qui facilite la réalisation des différents résultats avec le choix de l'utilisateur.

Nous nous appuyons également sur le panneau solaire pour alimenter notre système.

Finalement, il va sans dire, que le convertisseur DC-DC de type « Boost » à un domaine d'application très vaste dans l'électronique de puissance, notamment dans les alimentations à découpage.

ANNEXE

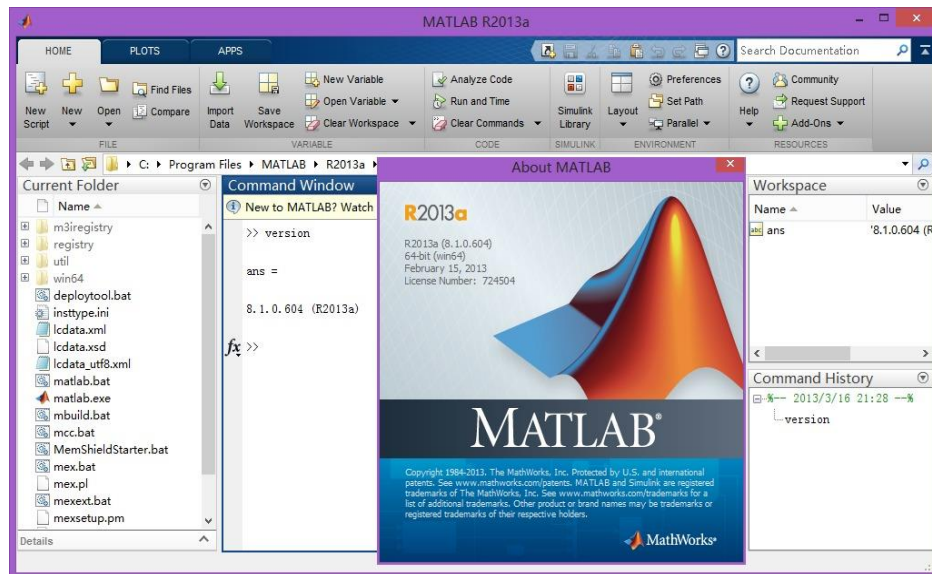
Promotion 2017



ANNEXE

Les Logiciels Utilisés

I. Matlab\SIMULINK_2013



II. Proteue Isis_8





ANNEXE

III. Arduino IDE

```
// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000); // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000); // wait for a second
}
```

Code de Voltmeter in Arduino

```
/*
DC Voltmeter
An Arduino DVM based on voltage divider concept
T.K.Hareendran
*/
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(7, 8, 9, 10, 11, 12);
int analogInput = 0;
float vout = 0.0;
float vin = 0.0;
float R1 = 100000.0; // resistance of R1 (100K) -see text!
float R2 = 10000.0; // resistance of R2 (10K) – see text!
int value = 0;
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(analogInput, INPUT);
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.print("DC VOLTMETER");
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  // read the value at analog input
  value = analogRead(analogInput);
  vout = (value * 5.0) / 1024.0; // see text
  vin = vout / (R2/(R1+R2));
  if (vin<0.09) {
    vin=0.0;//statement to quash undesired reading !
  }
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("INPUT V= ");
  lcd.print(vin);
  delay(500);
}
```



ANNEXE

Fiche technique de (Régulateur de panneau) CML20

Datasheet_CML_ENG

Final Version



CML05, CML08, CML10, CML15, CML20

Solar Charge Controllers



- + Battery State of Charge display with 3 LEDs
- + Acoustic load disconnect pre-warning
- + PWM regulation (series type)
- + Boost, Equalize and Float charging, also for VRLA
- + Automatic 12/24 Volt detection
- + Integrated temperature compensation
- + Large terminals (up to 16mm² wire size)
- + SOC and voltage controlled LVD
- + Fully electronically protected

The CML series is a sophisticated solar charge controller family for low cost applications. The electronic circuit is equipped with a microcontroller that provides high-efficiency charging technology together with a number of outstanding status display, warning and safety functions.

The temperature-compensated three-stage PWM charging method (boost-equalization-float) is now adjustable to sealed and vented lead-acid batteries. The new version also allows an either SOC or voltage controlled low voltage disconnect function. The battery status is clearly indicated by three LEDs.

As the first controller on the market in this price range it comes with an acoustic low voltage load disconnect pre-warning feature.

TYPE	CML05	CML08	CML10	CML15	CML20
Max. module current	5A	8A	10A	15A	20A
Max. load current	5A	8A	10A	15A	20A
System voltage	12/24V				
Self power consumption	<4mA				
Dimensions(WxHxD)	80x90x32mm				
Type of protection	IP22				

2007106
Subject to change without notice

www.phocos.com

Phocos AG, Germany
info@phocos.com

Phocos China Ltd., China
infochina@phocos.com

Phocos India Sales Pvt. Ltd., India
infoindia@phocos.com

Phocos Latin America S.R.L., Bolivia
infolatin@phocos.com

Phocos Rep. Office Australia, Australia
infoaustralia@phocos.com

Phocos Rep. Office Brazil, Brazil
infobrazil@phocos.com

Phocos Rep. Office Eastern Africa, Kenya
infoeastern@phocos.com

Phocos Eastern Europe S.R.L., Romania
infoeastern@phocos.com

Phocos SEA Pte Ltd, Singapore
infosea@phocos.com

Phocos Rep. Office South Africa
infosouth@phocos.com

Phocos Tunisia
infoafrica@phocos.com

Phocos USA
infousa@phocos.com



ANNEXE

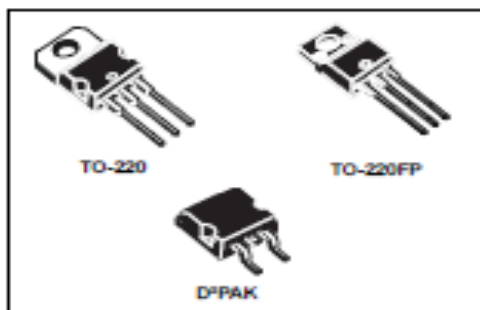
Fiche technique de (Régulateur) LM317



LM217, LM317

1.2 V to 37 V adjustable voltage regulators

Datasheet - production data



Description

The LM217, LM317 are monolithic integrated circuits in TO-220, TO-220FP and DPAK packages intended for use as positive adjustable voltage regulators. They are designed to supply more than 1.5 A of load current with an output voltage adjustable over a 1.2 to 37 V range. The nominal output voltage is selected by means of a resistive divider, making the device exceptionally easy to use and eliminating the stocking of many fixed regulators.

Features

- Output voltage range: 1.2 to 37 V
- Output current in excess of 1.5 A
- 0.1 % line and load regulation
- Floating operation for high voltages
- Complete series of protections: current limiting, thermal shutdown and GQA control

Table 1. Device summary

Order codes			
TO-220 (single gauge)	TO-220 (double gauge)	DPAK (tape and reel)	TO-220FP
LM217T	LM217T-DG	LM217DQ2T-TR	
LM317T	LM317T-DG	LM317DQ2T-TR	LM317P
LM317BT			

March 2014

DoolD2154 Rev 19

1/25

This is information on a product in full production.

www.st.com



ANNEXE

Fiche technique de (MOSFET) IRF830



IRF830

N - CHANNEL 500V - 1.35Ω - 4.5A - TO-220
PowerMESH™ MOSFET

TYPE	V _{DS}	R _{DS(on)}	I _D
IRF830	500 V	< 1.5 Ω	4.5 A

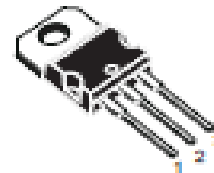
- TYPICAL R_{DS(on)} = 1.35 Ω
- EXTREMELY HIGH dv/dt CAPABILITY
- 100% AVALANCHE TESTED
- VERY LOW INTRINSIC CAPACITANCES
- GATE CHARGE MINIMIZED

DESCRIPTION

This power MOSFET is designed using the company's consolidated strip layout-based MESH OVERLAY™ process. This technology matches and improves the performances compared with standard parts from various sources.

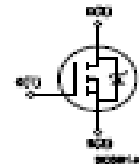
APPLICATIONS

- HIGH CURRENT, HIGH SPEED SWITCHING
- SWITCH MODE POWER SUPPLIES (SMPS)
- DC-AC CONVERTERS FOR WELDING EQUIPMENT AND UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLIES AND MOTOR DRIVER



TO-220

INTERNAL SCHEMATIC DIAGRAM



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V _{DS}	Drain-source Voltage (V _{GS} = 0)	500	V
V _{DSR}	Drain- gate Voltage (R _{GS} = 20 kΩ)	500	V
V _{GS}	Gate-source Voltage	± 20	V
I _D	Drain Current (continuous) at T _a = 25 °C	4.5	A
I _D	Drain Current (continuous) at T _a = 100 °C	2.9	A
I _{DS(•)}	Drain Current (pulsed)	18	A
P _{tot}	Total Dissipation at T _a = 25 °C	100	W
	Derating Factor	0.8	W/°C
dv/dt(1)	Peak Diode Recovery voltage slope	3.5	V/ns
T _{stg}	Storage Temperature	-85 to 150	°C
T _j	Max. Operating Junction Temperature	150	°C

(•) Pulse width limited by safe operating area

(1) I_{DS} = 4.5A, dv/dt = 25 A/μs, V_{GS} = V_{DS(peak)}, T_j = T_{max}

First Digit of the Datasheet Being Z or K Identifies Silicon Characterized in this Datasheet

August 1998

1/8



ANNEXE

Fiche technique de (Optocoupler) 4N26



4N25, 4N26, 4N27, 4N28

Optocoupler, Phototransistor Output, Vishay Semiconductors
with Base Connection

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ⁽¹⁾				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
COUPLER				
Isolation test voltage		V_{ISO}	5000	V_{RMS}
Creepage distance			≥ 7	mm
Clearance distance			≥ 7	mm
Isolation thickness between emitter and detector			≥ 0.4	mm
Comparative tracking index	DIN IEC 112/VDE 0303, part 1		175	
Isolation resistance	$V_{IO} = 500\text{ V}$, $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	R_{IO}	10^{12}	Ω
	$V_{IO} = 500\text{ V}$, $T_{amb} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	R_{IO}	10^{11}	Ω
Storage temperature		T_{stg}	-55 to +125	$^{\circ}\text{C}$
Operating temperature		T_{amb}	-55 to +100	$^{\circ}\text{C}$
Junction temperature		T_j	125	$^{\circ}\text{C}$
Soldering temperature ⁽²⁾	max. 10 s dip soldering; distance to seating plane $\geq 1.5\text{ mm}$	T_{sld}	260	$^{\circ}\text{C}$

Notes

⁽¹⁾ $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified.

Stresses in excess of the absolute maximum ratings can cause permanent damage to the device. Functional operation of the device is not implied at these or any other conditions in excess of those given in the operational sections of this document. Exposure to absolute maximum ratings for extended periods of the time can adversely affect reliability.

⁽²⁾ Refer to reflow profile for soldering conditions for surface mounted devices (SMD). Refer to wave profile for soldering conditions for through hole devices (DIP).

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ⁽¹⁾							
PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
INPUT							
Forward voltage ⁽²⁾	$I_F = 50\text{ mA}$		V_F		1.3	1.5	V
Reverse current ⁽²⁾	$V_R = 3\text{ V}$		I_R		0.1	100	μA
Capacitance	$V_R = 0\text{ V}$		C_D		25		pF
OUTPUT							
Collector base breakdown voltage ⁽²⁾	$I_C = 100\text{ }\mu\text{A}$		BV_{CBO}	70			V
Collector emitter breakdown voltage ⁽²⁾	$I_C = 1\text{ mA}$		BV_{CEO}	30			V
Emitter collector breakdown voltage ⁽²⁾	$I_E = 100\text{ }\mu\text{A}$		BV_{ECO}	7			V
$I_{CBO}(\text{dark})$ ⁽²⁾	$V_{CE} = 10\text{ V}$, (base open)	4N25			5	50	nA
		4N26			5	50	nA
		4N27			5	50	nA
		4N28			10	100	nA
$I_{CBO}(\text{dark})$ ⁽²⁾	$V_{CE} = 10\text{ V}$, (emitter open)				2	20	nA
Collector emitter capacitance	$V_{CE} = 0$		C_{CE}		6		pF
COUPLER							
Isolation test voltage ⁽¹⁾	Peak, 60 Hz		V_{IO}	5000			V
Saturation voltage, collector emitter	$I_{CE} = 2\text{ mA}$, $I_F = 50\text{ mA}$		$V_{CE(sat)}$			0.5	V
Resistance, input output ⁽²⁾	$V_{IO} = 500\text{ V}$		R_{IO}	100			G Ω
Capacitance, input output	$f = 1\text{ MHz}$		C_{IO}		0.6		pF

Notes

⁽¹⁾ $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified.

Minimum and maximum values are testing requirements. Typical values are characteristics of the device and are the result of engineering evaluation. Typical values are for information only and are not part of the testing requirements.

⁽²⁾ JEDEC registered values are 2500 V, 1500 V, 1500 V, and 500 V for the 4N25, 4N26, 4N27, and 4N28 respectively.

Bibliographie

Promotion 2017



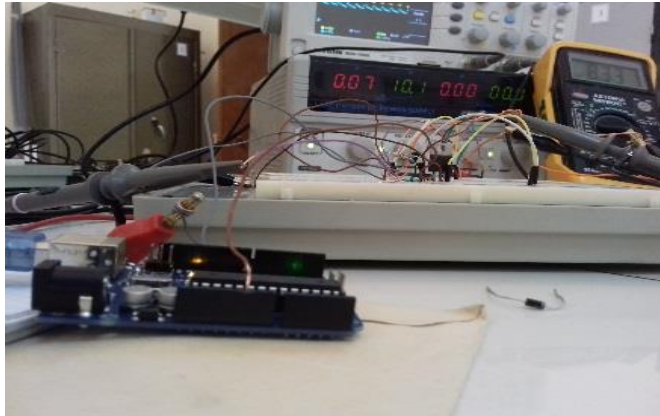
Référence Bibliographique

- [1] **B. Wafa** : « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2011.
- [2] **D. Narimene** : « Eude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université des Frères Mentouri-Constantine, 2014.
- [3] **Y. Fouad** : « Eude des nouvelles générations de cellules photovoltaïques », Mémoire de Magister, Université Mohamed Boudiaf-Oran, 2010.
- [4] **B. Abdelhalim** : « Eude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire », Mémoire de Magister, Université des Frères Mentouri-Constantine, 2009.
- [5] **F Slama** : « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Sétif (UFAS), 2011.
- [6] **L. Ismail, E.Yousri** : « Etude et réalisation d'une alimentation à base d'un panneau solaire suiveur pour l'alimentation d'un dispositif de pompage didactique », Mémoire de Master, Université Houari Boumedienne-Alger, 2011.
- [7] **M. Ouled Salem** : « Analyse, modélisation et simulation des pertes dans un module photovoltaïque à base de silicium monocristallin », Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2009.
- [8] **B. Othmane, D. Fathi** : « Eude et optimisation de fonctionnement d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2011.
- [9] **M. Aissa** : « Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid -Tlemcen, 2011
- [10] **A. Boden** : « Analyse optimisée du système de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université des Frères Mentouri-Constantine, 2009
- [11] **B. Nesrine Fatima** : « La Commande D'un Système Photovoltaïque D'un Satellite », Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid -Tlemcen, 2011.
- [12] **B. Issartel** : « Conception d'un convertisseur DC/DC de type boost », Projet P10AB04, Centre universitaire des sciences et techniques (Polytech Clermont- Ferrand), France, 2010.
- [13] http://physique.vije.net/BTS/index2.php?page=hacheur_p2
- [14] **EL M. Kamel** « Dimensionnement d'un hacheur survolteur », Projet p09AB06, Centre universitaire des sciences et techniques (Polytech Clermont- Ferrand), France, 2009.
- [15] <https://www.youtube.com/watch?v=Pv6zsQiBzXo>
- [16] <https://learn.adafruit.com/diy-boost-calc?view=all#the-calculator>
- [17] **P. Michel** : « Convertisseurs et électronique de puissance », l'Usine Nouvelle, dition DUNOUI 2007.
- [18] **A. Amin** « Etude et réalisation d'une commande MLI pilotant un hacheur série », Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2014.
- [19] **D. Smail** « Commande d'un moteur à courant continu via FPGA », Mémoire de Master, Université des Frères Mentouri-Constantine, 2015
- [20] <https://infouelec.wordpress.com/2013/03/24/arduino-quest-ce-que-cest/>
- [21] <https://zestedesavoir.com/forums/sujets/tag/94/arduino/>
- [22] **O.Nabil, B.Tarak** « Commande d'un moteur à courant continu alimenté par un hacheur avec La carte Arduino », Mémoire de Master, L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2016.
- [23] **S. Mohammed Ridha, CH.Nouredine** « Etude et réalisation d'un variateur de vitesse - PWM-par Arduino », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2016.
- [24] **B. Charaf Eddine, T.Abdel Kader** « Étude et simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant continu », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2016.
- [25] **M.SALAH-EDDINE** « réalisation d'un onduleur de Tension monophasé contrôle par une Carte arduino », Mémoire de Master, Université des Frères Mentouri-Constantine, 2013



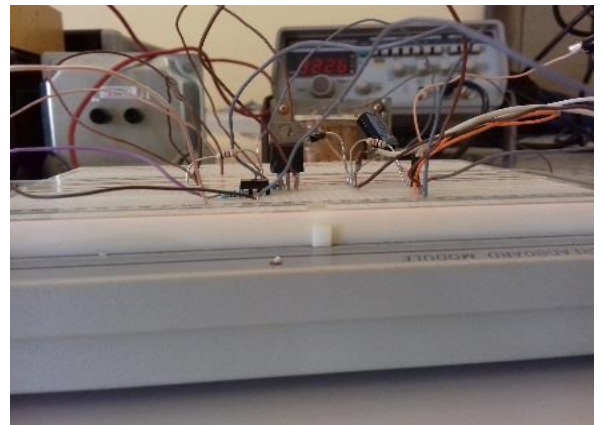
Référence Bibliographique

- [26] <https://www.astuces-pratiques.fr/electronique/regulateur-de-tension-lm317-montages>
- [27] <https://yadom.fr/arduino-uno-smd-rev3.html>
- [28] <https://zestedesavoir.com/forums/sujets/tag/94/arduino/>



☞ Pour plus d'information sur ce projet, connecter avec nous :

✉ Madani.tedjini@gmail.com
✉ taha.hanancha39@hotmail.fr





*A cœur vaillant
rien d'impossible conscience tranquille
Tout est accessible Quand il y a la soif d'apprendre
Tout vient à point à qui sait attendre Quand il y a le souci de
Réaliser un dessein Tout devient facile pour arriver à nos fins
Malgré les obstacles qui s'opposent En dépit des difficultés qui s'interposent
Les études sont avant tout Notre unique et seul atout Ils représentent la lumière de notre existence
L'étoile brillante de notre réjouissance Comme un vol de gersauts hors du charnier natal
Nous partons ivres d'un rêve héroïque et brutal Espérant des lendemains épiques
Un avenir glorieux et magique Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis
Jour et nuit, nous mènera vers le bonheur fleuri Aujourd'hui,
Ici rassemblés auprès des jurys, Nous prions dieu
Que cette soutenance Fera signe de persévérance
Et que nous serions enchantés
Par notre
Travail
Honora é*